



Revue de littérature sur les normes du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection concernant les aires de protection des prélèvements d'eau souterraine

Recherche bibliographique

Rédigée par :

Louison Marie⁽¹⁾,

Marie-Catherine Talbot Poulin⁽²⁾,

Yohann Tremblay⁽²⁾ et

John Molson⁽²⁾

⁽¹⁾ Université de Rennes 1

⁽²⁾ Université Laval

Juillet 2016

Résumé

Les normes concernant les aires de protection des sources d'eau potable souterraine sont variables d'une juridiction à l'autre. En général, une approche similaire basée par temps de transport pour délimiter les aires par rapport au prélèvement est préconisée par le Québec et les états voisins, mais les temps déterminés pour prévenir les contaminations microbiologiques diffèrent. Cela est dû, entre autres, à la complexité du transport et de la survie des virus et des bactéries qui dépend de nombreux paramètres, propres à l'agent pathogène ou au milieu. La température et l'adsorption semblent être dominantes dans l'inactivation des agents pathogènes. Il apparaît important de tenir compte des variations des conditions du milieu aquifère ainsi que des variations climatiques (notamment des événements extrêmes) dans l'établissement des normes pour la détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine. La recherche bibliographique présentée dans ce rapport ne permet pas de comprendre d'où proviennent les temps de transport et les distances prescrites par les différentes réglementations, ni de valider ou d'invalider les normes du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) concernant les temps de survie des virus et des bactéries. Il serait pour cela nécessaire de réaliser des études dans les conditions hydrogéologiques du Québec.

Note aux lecteurs

Cette recherche bibliographique a été réalisée par une étudiante de l'Université de Rennes 1 dans le cadre d'un stage de Master en hydrogéologie à l'Université Laval.

Table des matières

Résumé	- 1 -
Note aux lecteurs	- 1 -
I. Introduction	- 3 -
II. Résultats	- 4 -
1. Comparaison avec les juridictions voisines du Québec.....	- 4 -
2. Revue scientifique.....	- 8 -
2.1. Caractéristiques influençant le transport et la survie des agents pathogènes	- 8 -
2.2. Distances et temps de migration des agents pathogènes	- 13 -
III. Discussion et conclusion	- 15 -
Bibliographie.....	- 17 -

I. Introduction

Le constat de problèmes liés à une mauvaise qualité de l'eau, notamment l'incident de Walkerton ayant causé des cas de décès et maladies dus à une contamination en E. Coli (O'Connor, 2002), a entraîné une remise en question des aires de protection des sources d'eau potable au Québec. Pour contribuer à la protection de la santé publique, le Règlement sur le captage des eaux souterraines (RCES) a été adopté en 2003, suivi du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) en 2014. Ce dernier établit des aires de protection autour des prélèvements d'eau souterraine destinés à la consommation humaine ou à des fins de transformation alimentaire. Le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) a mandaté l'Université Laval pour rédiger un guide technique présentant une marche à suivre pour déterminer ces aires de protection. Le présent rapport s'inscrit dans cette démarche et a pour objectif de documenter les normes du RPEP concernant les aires de protection par une synthèse des normes en vigueur dans les juridictions voisines du Québec et par une revue de la littérature scientifique concernant la survie des agents pathogènes dans les eaux souterraines.

Dans un premier temps, les distances prescrites et les temps de migration indiqués pour chaque catégorie de prélèvement et chaque type d'aire de protection au Québec et dans les juridictions voisines sont recensés. Dans un second temps, une recherche des publications scientifiques concernant les temps de survie, l'estimation des distances de migration et les conditions du milieu naturel influençant la survie des bactéries et des virus dans les eaux souterraines est effectuée.

Le présent rapport constitue donc une comparaison et un aperçu des connaissances actuelles en lien avec les normes concernant les aires de protection des prélèvements d'eau souterraine. La méthodologie consiste à recueillir et synthétiser des informations provenant d'une recherche documentaire (articles scientifiques, rapports et sites internet) et d'échanges avec le MDDELCC ainsi qu'avec des représentants des ministères des états voisins du Québec.

II. Résultats

1. Comparaison avec les juridictions voisines du Québec

Pour évaluer les normes concernant les aires de protection des prélèvements d'eaux souterraines, la connaissance des réglementations en vigueur dans les états voisins du Québec est nécessaire. Le *tableau 1* rapporte les différentes catégories de prélèvements recensées au Québec et dans quelques juridictions voisines ayant adopté des mesures de protection de leurs sources d'eau potable, soient le Nouveau-Brunswick, la Nouvelle-Écosse, l'Ontario, le Vermont et le Maine. Le *tableau 2* présente une synthèse des limites des aires de protection par rapport aux prélèvements pour les comparer à celles prescrites au Québec (immédiate, intermédiaire et éloignée). Les différentes lois et règlements étant complexes et intégrant de nombreux détails et exceptions, cette synthèse se veut générale et ne tient pas compte de tous les aspects des différentes réglementations.

La définition des catégories de prélèvement varie d'une juridiction à l'autre. Tout comme les états du Maine et du Vermont, les catégories de prélèvement du Québec sont définies selon l'usage fait de la source d'eau (type de réseau et nombre de personnes alimentées). Les provinces de l'Ontario, du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse exigent pour leur part la délimitation d'aires de protection pour les prélèvements municipaux seulement.

Malgré ces différences de classification des prélèvements, il est possible de comparer les limites des aires de protection prescrites par les différentes juridictions. Il existe des équivalences dans la hiérarchisation des aires de protection (d'immédiate à éloignée) bien que la nomenclature ne soit pas identique d'une juridiction à l'autre.

Dans toutes les juridictions étudiées, l'aire de protection immédiate est définie par une distance correspondant à un rayon autour du prélèvement, à l'exception du Maine où cette aire n'est pas définie. Au Nouveau-Brunswick et au Vermont, les distances varient en fonction des activités ayant cours à proximité du prélèvement, tandis qu'au Québec, en Ontario et en Nouvelle-Écosse seul un rayon fixe est prescrit. La distance exigée la plus conservatrice est retrouvée en Ontario, avec un rayon fixe de 100 m. La distance de 30 m pour les catégories de prélèvement 1 et 2 au Québec est donc en comparaison moins sécuritaire.

Pour la plupart des juridictions, un temps de transport plutôt qu'une distance est couramment utilisé pour délimiter les aires de protection intermédiaires. Deux aires

intermédiaires sont souvent prescrites, la plus petite visant généralement à prévenir la contamination microbiologique et la plus grande, la contamination chimique incluant les composés dissous et ceux de la phase non aqueuse. La distinction entre les contaminations bactériologique (200 jours) et virologique (550 jours) pour les organismes pathogènes n'existe qu'au Québec. Pour l'Ontario et la Nouvelle-Écosse, l'aire de protection microbiologique correspond à un temps de transport de 2 ans (730 jours), ce qui est plus conservateur qu'au Québec. Le Vermont définit aussi une de ses aires avec un temps de transport similaire. Le Nouveau-Brunswick est la seule juridiction qui distingue le type d'aquifère pour la définition de sa plus petite aire de protection intermédiaire, avec des valeurs de 100 jours pour un aquifère poreux et de 250 jours pour un aquifère de roc, distances qui sont considérablement moindres que celles imposées par les autres juridictions. Toutefois, cette province, ainsi que la Nouvelle-Écosse et l'Ontario, prescrit des aires intermédiaires plus larges correspondant à un temps de transport de 5 ans, ce qui est bien supérieur aux aires intermédiaires du Québec. Au Québec, des distances fixes de 30 à 200 m sont imposées pour les aires intermédiaires des catégories de prélèvement moins importantes (2 et 3). Au Maine et au Vermont, des rayons fixes sont aussi utilisés, mais sont supérieurs, variant de 100 m à 900 m selon les usages ou le débit exploité. Bref, pour les aires intermédiaires, il n'y a pas de consensus sur les limites sécuritaires de temps de transport. Pour les distances et temps de transport prescrits, ceux du Québec sont, d'ordre général, moyennement conservateurs en comparaison avec les juridictions voisines. La distinction du type d'aquifère en présence serait pertinente à considérer.

Au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse, les aires de protection éloignées sont définies uniquement par des temps de transport de 5 à 25 ans. L'Ontario impose aussi une aire de protection similaire, mais ajoute l'aire d'alimentation entière du puits et des notions plus subjectives de temps de réaction en cas de contamination. Pour le Vermont, la notion de zone d'alimentation est évoquée, mais non imposée, car elle est modulée en fonction des sources potentielles de contamination. L'aire d'alimentation entière requise en Ontario et au Québec (pour les prélèvements de catégorie 1) est donc la limite la plus sécuritaire en comparaison avec les autres juridictions. La distance fixe de 2 km pour les aires éloignées des prélèvements de catégorie 2 du Québec est aussi plus conservatrice que les limites imposées par le Maine qui est le seul autre état à prescrire des rayons fixes autour des prélèvements, mais aux distances beaucoup plus faibles. Il est à noter que l'analyse de chaque activité proscrite pour chaque juridiction à l'intérieur de ces aires n'a pas été effectuée.

Tableau 1 : Catégories de prélèvement au Québec et dans des états voisins

État	Catégorie de prélèvement	Description
Québec	Catégorie 1	Système d'aqueduc d'une municipalité alimentant plus de 500 personnes et au moins une résidence
	Catégorie 2	a) Système d'aqueduc d'une municipalité alimentant de 21 à 500 personnes et au moins une résidence b) Tout autre système d'aqueduc alimentant 21 personnes et plus et au moins une résidence c) Système indépendant d'un système d'aqueduc alimentant 21 personnes et plus et au moins un établissement d'enseignement, un établissement de détention ou un établissement de santé et de services sociaux
	Catégorie 3	a) Système indépendant d'un système d'aqueduc alimentant exclusivement un ou des établissements utilisés à des fins de transformation alimentaire b) Système indépendant d'un système d'aqueduc alimentant au moins une entreprise ou un établissement touristique ou touristique saisonnier c) Tout autre système alimentant 20 personnes et moins (incluant les puits individuels)
Nouveau-Brunswick	Prélèvements municipaux	
Nouvelle-Écosse	Prélèvements municipaux	
Ontario	Système de type I	Réseaux municipaux d'eau potable existants ou envisagés qui desservent ou desserviront de grands aménagements résidentiels
	Système de type II	Réseaux d'eau potable existants ou envisagés désignés par résolution d'un conseil municipal
	Système de type III	Réseaux d'eau potable existants ou envisagés désignés par le ministre
Maine	Système public d'eau communautaire desservant 250 personnes et plus	
	Système public d'eau communautaire desservant moins de 250 personnes	
	Système d'eau non communautaire	Non transitoire
Transitoire		Desservant au moins 25 personnes, non nécessairement les mêmes, au moins 60 jours par an, incluant une aire d'autoroute, un restaurant saisonnier, un motel saisonnier, un parcours de golf, un parc ou un terrain de camping
Vermont	Système public d'eau communautaire	Ayant au moins 15 connexions ou desservant au moins 25 personnes/jour durant toute l'année
	Système public d'eau non communautaire	Non transitoire
		Transitoire

Tableau 2 : Limites par rapport au prélèvement des aires de protection du Québec et d'états voisins

État	Aire de protection			Éloignée		
	Immédiate	Intermédiaires				
Québec	Catégories 1 et 2 : 30 m Catégorie 3 : 3 m	Catégorie 1 : 200 j Catégorie 2 : 100 m Catégorie 3 : 30 m (contaminants bactériologiques)	Catégorie 1 : 550 j Catégorie 2 : 200 m Catégorie 3 : 100 m (contaminants virologiques)	Catégorie 1 : Aire d'alimentation Catégorie 2 : 2 km en amont hydraulique Catégorie 3 : non délimitée		
Nouveau-Brunswick	De 3 à 30 m en fonction de différentes activités	<u>Aquifère poreux</u> : 100 j <u>Aquifère de la roche mère</u> : 250 j	De 100 ou 250 j à 5 ans	De 5 à 25 ans		
Nouvelle-Écosse	30 m	De 0 à 2 ans (contaminants microbiologiques et chimiques)	De 2 à 5 ans (contaminants chimiques)	De 5 à 25 ans (contaminants persistants et contaminants chimiques mobiles)		
Ontario	<u>Types I, II et III</u> : 100 m	<u>Types I, II et III</u> : de 100 m à 2 ans (zone de gestion des pathogènes)	<u>Types I, II et III</u> : de 2 à 5 ans zone de protection (contamination chimique incluant les composés dissous et ceux de la phase non aqueuse)	<u>Types I, II et III</u> : de 5 à 25 ans	Type I : Temps suffisant pour permettre à l'opérateur du système de répondre à un déversement ou tout autre événement susceptible d'altérer la qualité de l'eau	Type I : Aire d'alimentation
Vermont	De 3 à 60 m selon la catégorie de prélèvement, en fonction de différentes activités	<u>Système public d'eau communautaire</u> : de 300 à 900 m en fonction du débit exploité	2 ans pour toutes les catégories de prélèvement	<u>Système public d'eau communautaire</u> : zone de recharge ou zone de contribution où il peut y avoir des impacts de sources potentielles de contamination		
Maine	Non définie	100 m d'une source potentielle de contamination 300 m d'un réservoir de stockage souterrain		<u>Système public d'eau communautaire de 250 personnes et plus</u> : plan montrant toutes les sources de contamination à l'intérieur d'un rayon de 750 m <u>Système public d'eau communautaire de moins de 250 personnes</u> : plan montrant toutes les sources de contamination à l'intérieur d'un rayon de 300 m <u>Système d'eau non communautaire</u> : plan montrant toutes les sources de contamination à l'intérieur d'un rayon de 100 m		

2. Revue scientifique

La présence de bactéries et de virus dans l'eau peut être à l'origine de maladies chez le consommateur, c'est pourquoi il est nécessaire d'assurer une bonne qualité de l'eau. Certaines activités telles que l'agriculture et l'enfouissement sanitaire ainsi que les effluents septiques sont connues pour être une source d'agents pathogènes (Yates et al., 1985, Scandura et Sobsey, 1997, Bradbury et al., 2013, Kozuskanich et al., 2014).

La section suivante rassemble des informations issues d'articles scientifiques sur les temps de survie, les distances de migration et les conditions naturelles du milieu influençant la survie des virus et des bactéries dans les eaux souterraines.

2.1. Caractéristiques influençant le transport et la survie des agents pathogènes

Différentes caractéristiques influencent le transport et la survie des virus et bactéries dans les eaux souterraines. Ces caractéristiques peuvent être propres à l'agent pathogène en soit ou aux conditions du milieu (eaux souterraines, aquifère et zone non saturée). Le processus d'adsorption joue également un rôle important dans le transport et l'inactivation des organismes pathogènes.

2.1.1. Caractéristiques de l'agent pathogène

Les bactéries et virus possèdent des caractéristiques physico-chimiques et biologiques propres pouvant varier d'un agent pathogène à l'autre. En effet, la taille, le taux d'inactivation, les propriétés électrostatiques de la surface, les propriétés mécaniques et la motilité des agents pathogènes influencent leur survie et leur transport dans les eaux souterraines (Robertson, 1997, Brumley et al., 2015, Bai et al., 2016). Quelques études sur le sujet sont résumées dans les paragraphes suivants. Ces études portent spécifiquement sur certaines espèces de virus et de bactéries. Elles témoignent de la complexité du sujet et ne permettent pas de faire ressortir des tendances générales claires.

- L'étude menée par Powell et al. (2003) a révélé qu'il ne semblait pas y avoir de relation entre la présence ou l'absence d'indicateurs bactériens de contamination d'eaux usées et la présence ou l'absence de virus dans les aquifères de grès situés au niveau des villes de Nottingham et Birmingham (Royaume-Uni). Locas et al. (2008) indiquent plutôt que l'absence de

coliformes totaux à un site semble une bonne indication de l'absence de virus entériques.

- L'étude de Bitton et al. (1983) a comparé trois bactéries (*Salmonella typhimurium*, *Streptococcus faecalis*, *Escherichia coli*), un entérovirus (poliovirus 1) et un coliphage (phage f2). L'expérience a été réalisée à l'aide de flacons incubés à 22°C, avec de l'eau souterraine d'un puits d'une profondeur de 145m en Floride. Les résultats de cette expérience ont montré que le poliovirus 1 et la bactérie *S.faecalis* avaient les plus faibles taux de décroissance, suivis de *S.typhimurium* et *E.coli*. Le phage f2 avait le plus haut taux de décroissance, plus de 10 fois supérieur à celui d'un quelconque autre organisme.
- L'étude de Keswick et al. (1982) a comparé le coxsackievirus B3, le poliovirus 1, le rotavirus SA11, le phage f2, *E.coli* et un streptocoque fécal d'eaux usées isolé dans l'eau souterraine. Les organismes ont été mis dans une chambre de survie McFeters, à température variant entre 3 et 15°C, et exposés à un flux continu d'eau souterraine d'un puits de 84 m de profondeur. Les entérovirus poliovirus 1 et coxsackievirus B3 avaient des taux de décroissance plus faibles que ceux des deux bactéries. Rotavirus SA11 et le phage f2 étaient inactivés plus rapidement que les bactéries.
- Les transports des bactéries d'*Escherichia coli* et *Klebsiella sp.* ont été mesurés par Bai et al., (2016) dans trois milieux poreux avec différentes tailles et distributions des pores et grains, dans des conditions d'écoulement saturé. Les voies d'écoulement des bactéries étaient davantage non uniformes par rapport à celles des traceurs de l'eau pour chaque milieu poreux. Alors que la non-uniformité des voies d'écoulement des bactéries augmentait avec l'augmentation de l'hétérogénéité du milieu poreux pour *Klebsiella sp.*, aucune tendance claire n'a été obtenue pour *E.coli*. Les mêmes taux de rétention ont été obtenus dans tous les milieux poreux pour le motile *E.coli* alors que la rétention du non motile *Klebsiella sp.* diminuait dans le milieu présentant les pores les plus larges et une gamme importante de distribution de tailles des pores. Le transport de *Klebsiella sp.* était rapide au niveau des larges pores interconnectés et était absent dans les petits pores. Le transport préférentiel de *Klebsiella sp.* réduit le contact entre les bactéries et les sites de rétention. Cette

tendance n'a pas été confirmée pour E.coli pour lequel aucune relation linéaire entre le transport non uniforme, la porosité et la rétention n'a été obtenue.

2.1.2. Caractéristiques du milieu naturel

La concentration bactérienne présente des variations temporelles et spatiales importantes dans les milieux naturels (Powell et al., 2003, Levison et al., 2009). Les conditions du milieu, incluant les caractéristiques physico-chimiques de l'eau souterraine, de l'aquifère et de la zone non saturée, peuvent influencer le transport et la survie des agents pathogènes (Robertson, 1997). Les caractéristiques recensées dans la littérature sont énumérées dans les paragraphes suivants. La plupart des études ont été réalisées en laboratoire ou dans des conditions de terrain différentes de celles du Québec.

- a. La vitesse d'écoulement. Une vitesse d'écoulement plus importante entraîne un transport plus rapide des agents pathogènes.
- b. La taille des grains et des pores. L'étude de Jiang et al. (2007) indique que la récupération bactérienne dans le lixiviat de colonnes de sables grossiers saturés était significativement plus élevée que dans le cas de colonnes de sables fins et non saturés.
- c. Le niveau de saturation en eau. L'étude de Jiang et al. (2007) précédente suggère une plus grande survie bactérienne dans le milieu saturé.
- d. Le type de milieu aquifère (homogène ou hétérogène, granulaire ou fracturé). Selon Powell et al., (2003), l'augmentation de la fréquence de contamination avec la profondeur coïncide avec des hétérogénéités géologiques telles que des fissures.
- e. La salinité. Selon Bordalo et al., (2002), la survie est plus élevée quand la salinité est plus faible.
- f. La teneur en matière organique solide. Certains virus et bactéries étant hydrophobes à des degrés divers, cela les amène à adhérer à la matière organique solide (Robertson, 1997).
- g. Le pH. Davantage de virus sont observés quand le pH des eaux souterraines est élevé (Scandura et Sobsey, 1997).
- h. La présence de particules solides en suspension. Les particules en suspension favorisent le processus d'adsorption (Bitton, 1975).

- i. La composition minérale. Selon Bitton (1975), l'adsorption des virus est dépendante de la présence de cations dans le milieu.
- j. La température. Selon Schijven et Hassanizadeh, (2000), la température semble être le facteur le plus important pour l'inactivation des virus. L'inactivation des virus est plus importante à des températures plus élevées, particulièrement pour des températures supérieures à 20°C. Cependant, d'après John et Rose (2005), l'extinction des bactéries coliformes dans les eaux souterraines ne montre pas de dépendance avec la température. Selon Bai et al. (2016), le taux de survie d'E.coli est dépendant de la température ; la dépendance de l'inactivation d'E.coli avec la température varie en fonction des sources d'eau. Selon Gordon et Toze (2003), les virus et E. coli présentent la décomposition maximale dans des conditions aérobies, à 28°C et en présence de micro-organismes dans les eaux souterraines. Yates et al., (1985) stipulent que la température est la seule variable significativement corrélée avec les taux de désintégration des virus poliovirus 1, échovirus 1 et MS-2 coliphage. Selon l'étude de DeBorde et al. (1998), le coliphage ensemencé présente des taux d'extinction faibles à la température ambiante de l'eau souterraine.
- k. Les micro-organismes. D'après Gordon et Toze (2003), la présence de micro-organismes dans l'eau souterraine serait le facteur le plus influent sur la désintégration des virus et d'E.coli.
- l. L'oxygène et les nutriments. La présence d'oxygène et de nutriments agit indirectement sur la survie des pathogènes par impact, en combinaison avec la température, sur la présence de micro-organismes (Gordon et Toze, 2003).
- m. Les conditions météorologiques. Les conditions météorologiques peuvent jouer un rôle important dans la concentration des agents pathogènes que l'on retrouve dans les eaux souterraines et peuvent provoquer des variations saisonnières de cette concentration (Scandura et Sobsey, 1997, Bradbury et al., 2013). La recharge, qui provient des précipitations, permet à la fois le transport et donc l'apport des contaminants dans les eaux souterraines, mais sont également à l'origine du mécanisme de dilution permettant une diminution de la concentration en pathogènes (Levison et al., 2009). Les événements météorologiques extrêmes peuvent aussi avoir un impact sur la qualité de l'eau souterraine par l'augmentation des concentrations en micro-organismes pathogènes, ainsi qu'en matières en suspension, matière organique, nutriments

et substances inorganiques (Heather et al., 2004 et Khan et al., 2015). Khan et al., (2015) dénombrent quelques exemples d'effets de ces événements sur la qualité de l'eau :

- La perte temporaire d'approvisionnement en eau et la faible pression d'eau suite à un événement météorologique glacial aux États-Unis ont conduit à une augmentation des taux de maladies gastro-intestinales aiguës dans les ménages affectés.
- D'après 46 études de cas en Australie et aux États-Unis, les événements de forte précipitation, entraînant un ruissellement de surface (avec eaux usées brutes), étaient signalés comme ayant la plus grande gamme d'impacts potentiels sur les services d'eau, en induisant une augmentation des pathogènes et des épidémies potentielles de gastro-entérites aiguës.
- De fortes précipitations et inondations, ainsi que des tempêtes et vents forts, peuvent entraîner une augmentation de la turbidité, un débordement des égouts et des dommages au niveau des infrastructures et donc une augmentation des concentrations en pathogènes et contaminants.
- Une sécheresse ou une chaleur extrême peut provoquer une augmentation de nutriments et une intrusion d'eau saline dans l'eau souterraine de la zone côtière.
- Les incendies peuvent être à l'origine d'une augmentation des nutriments et des contaminants dans les eaux souterraines, d'une activité microbienne élevée et peuvent être un apport de produits chimiques présents dans les produits de lutte contre les incendies.

Yates et al. (1985), affirment qu'en utilisant toutes les variables physiques et chimiques de l'eau (température, pH, ammoniaque, nitrates, solides dissous totaux, turbidité et dureté), plus de 90% de la variation des taux de décroissance des micro-organismes pourrait être prédite.

2.1.3. Le processus d'adsorption

L'adsorption, correspondant à la fixation de l'agent pathogène sur une surface solide, joue un rôle important dans le transport et la survie des agents pathogènes. Il s'agit d'un

processus majeur déterminant la suppression des virus (Schijven et Hassanizadeh, 2000). Toutefois, selon John et Rose (2005), l'adsorption est dépendante du type de virus ; par exemple, le PRD-1 sera plus rapidement inactivé s'il est adsorbé, alors que l'hépatite A et le poliovirus auront un temps de survie plus important. L'adsorption au niveau de l'interface air-eau joue également un rôle important dans le transport d'E.coli dans des colonnes de sable (Jiang et al., 2007).

Le processus d'absorption dépend aussi des conditions du milieu. À pH 7 et plus, les conditions seront généralement non favorables à la fixation (Schijven et Hassanizadeh, 2000). Les virus s'adsorberont plus facilement à une surface mineure des grains chargée positivement (cations) (Schijven et Hassanizadeh, 2000).

Il est important de noter que le processus d'adsorption peut être réversible, c'est-à-dire que les virus peuvent être inactivés seulement temporairement avant de se désorber d'une surface solide et ainsi regagner le flux des eaux souterraines (Carlson et al., 1968, Bitton, 1975, DeBorde et al., 1998). Les virus adsorbés sont donc une source de virus infectieux pouvant entrer dans l'eau souterraine longtemps après l'événement de contamination initial.

2.2. Distances et temps de migration des agents pathogènes

Certains temps et distances de migration maximum des agents pathogènes dans les eaux souterraines ont été rapportés dans la littérature et sont présentés dans les paragraphes suivants. La plupart sont tirées d'études dans des conditions de terrain spécifiques et ne peuvent être généralisés.

Pour les bactéries :

- a. Distance de migration de 600m dans un aquifère de sable (Robertson, 1997).
- b. Temps de survie inférieur à 70 jours, mais généralement inférieur à 20 jours dans des sols non saturés pour les coliformes fécaux et *Salmonella* spp. (EPA, 2002).
- c. Selon Arnaud et al. (2015), les bactéries fécales peuvent contaminer des aquifères, même si l'épaisseur de la zone de sédiments non saturés est supérieure à 10m. De plus, les voies préférentielles d'écoulement et la remobilisation de bactéries au moins trois mois après un traitement peuvent être importantes.

Pour les virus :

- a. Pénétration à des profondeurs jusqu'à 67m (Yates et al., 1985).
- b. Distance de migration de 1000 à 1600m dans des calcaires canalisés (Robertson, 1997).
- c. Distance de migration de 250 à 408m dans des aquifères glaciaires limon-sable (Yates et al., 1985, Robertson, 1997).
- d. Temps de survie inférieur à 100 jours, mais généralement inférieur à 20 jours dans des sols non saturés (EPA, 2002).
- e. Selon l'EPA (2002), les virus peuvent persister dans le sol jusqu'à 125 jours, et selon Robertson (1997) des distances de 210 à 325m de fosses septiques sont nécessaires pour réduire d'un ordre de 11 les concentrations de virus.
- f. D'après DeBorde et al. (1999), les pics de virus mesurables dépassent les 30m (100 pieds) couramment utilisés entre les puits et les fosses septiques dans le Montana et la plupart des États.
- g. D'après Schijven et Hassanizadeh (2000), les prévisions de suppression de virus sur de grandes distances sont surestimées si elles sont fondées sur des données à partir d'expériences de colonnes ou d'études sur le terrain sur de courtes distances.
- h. D'après Seitz et al. (2011), le virus de Norwalk dans les eaux souterraines peut rester détectable pendant plus de 3 ans et peut demeurer infectieux pendant au moins 61 jours.
- i. Une partie des virus ensemencés dans un système septique a été transportée au moins aussi vite que le traceur de bromure (1 à 2,9m/j) dans l'aquifère sable-gravier non confiné (DeBorde et al., 1998).

Pandey et al. (2014) affirment que les pathogènes peuvent survivre jusqu'à 400 jours en fonction de la température du sol.

III. Discussion et conclusion

Les réglementations en matière d'aires de protection des prélèvements d'eaux souterraines sont différentes d'un état à l'autre. La catégorisation des prélèvements varie d'une juridiction à l'autre de même que la définition des différentes limites. Il existe toutefois des correspondances permettant de les comparer. Les aires de protection immédiates sont toujours définies par des distances ; les valeurs de 3 et 30 m au Québec, selon la catégorie de puits, sont moins sécuritaires que les 100 m prescrit par l'Ontario, mais semblables aux autres juridictions voisines. Pour les aires de protection intermédiaire, la distinction entre virus et bactéries n'est faite pour aucune autre juridiction. Il n'y a pas de consensus sur les limites sécuritaires de temps de transport ou de distances fixes prescrites. Pour les distances fixes, celles des catégories de prélèvement 2 et 3 du Québec semblent être moins sécuritaires, mais les aires de protection des provinces voisines sont rapportées pour les puits municipaux seulement. Pour l'aire éloignée, l'utilisation de l'aire d'alimentation complète au Québec et en Ontario est le plus conservateur. L'analyse de chaque activité proscrite pour chaque juridiction à l'intérieur de chacune des aires devrait toutefois être réalisée pour confirmer ces tendances.

Quelques réglementations recensées dans ce rapport tiennent compte des différentes sources d'agents pathogènes connues (effluents septiques, agriculture, etc.). Cependant, les distances arbitraires ne tiennent pas compte du milieu (granulaire ou fracturé) ni du sens et de la vitesse d'écoulement, paramètres influençant pourtant le transport des agents pathogènes. La distinction en fonction du type d'aquifère, telle que faite au Nouveau-Brunswick, serait une avenue intéressante qui améliorerait les critères de distance.

Il n'a pas été possible de retrouver dans la littérature scientifique d'où proviennent les temps de transport et les distances prescrites par les différentes réglementations. Le transport et la survie des virus et bactéries dans les eaux souterraines sont des processus complexes faisant intervenir de nombreux paramètres, propres au milieu et à l'agent pathogène. La difficulté de déterminer des aires de protection à rayon fixe, pouvant s'appliquer à différentes sources d'eaux souterraines destinées à la consommation ou à des fins de transformation alimentaire, explique sans doute la diversité des réglementations à ce sujet. La revue de littérature ne permet pas non plus de valider ou d'invalider la réglementation québécoise actuelle concernant les temps de survie des virus et des bactéries. Néanmoins, certains temps

et distances de migration ont été recensés, mais ceux-ci sont fonction des conditions spécifiques aux études, soit celles du milieu d'écoulement et de l'agent pathogène.

L'intégration de quelques facteurs comme le type d'aquifère ou la direction d'écoulement pourrait améliorer l'efficacité des critères de distances fixes. Il serait aussi utile de réaliser des études supplémentaires effectuées dans les conditions hydrogéologiques du Québec (température, milieux, etc.), de manière à ne pas surestimer ou sous-estimer ces distances, celles-ci pouvant avoir un impact économique important.

Les résultats de la présente étude seront utilisés pour l'élaboration du guide technique présentant une démarche de détermination d'aires de protection autour de sites de prélèvements d'eau au Québec, actuellement en cours de conception, en mettant de l'avant la nécessité de tenir compte des conditions du milieu et des caractéristiques des agents pathogènes.

Bibliographie

- Affaires autochtones et du Nord Canada (2014). Eau potable, eaux usées et sources d'eau potable : Résumé des règlements du Nouveau-Brunswick. [En ligne]. <http://www.aadnc-aandc.gc.ca/fra/1408152643304/1408152686748> (consulté le 6 mai 2016).
- Arnaud E., Best A., Parker B. L., Aravena R., Dunfield K. (2015). Transport of *Escherichia coli* through a thick vadose zone. *Journal of Environmental Quality*, 44(5): 1424-1434.
- Auld H., MacIver D. and Klaassen J. (2004) Heavy rainfall and waterborne disease outbreaks: The Walkerton example. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 67:20-22, 1879-1887.
- Bai H., Cochet N., Drelich A., Pauss A., Lamy E. (2016). Comparison of transport between two bacteria in saturated porous media with distinct pore size distribution. *RSC Advances*, 6(18): 14602-14614.
- Bitton, G. (1975). Adsorption of viruses onto surfaces in soil and water. *Water Res.*, 9(5-6): 473-484.
- Bitton, G., Farrah S.R., Ruskin R. H., Butner J., and Chou Y.J. (1983). Survival of pathogenic and indicator organisms in ground water. *Ground Water* 21: 405-410.
- Bordalo A.A., Onrassami R., Dechsakulwatana C. (2002). Survival of faecal indicator bacteria in tropical estuarine waters (Bangpakong River, Thailand). *Journal of Applied Microbiology*, 93(5): 864-871.
- Bradbury K.R., Borchardt M.A., Gotkowitz M., Spencer S.K., Zhu J. and Hunt R.J. (2013). Source and transport of human enteric viruses in deep municipal water supply wells. *Environ. Sci. Technol.*, 47(9): 4096-4103.
- Brumley D. R., Rusconi R., Son K., Stocker R. (2015). Flagella, flexibility and flow: Physical processes in microbial ecology. *European Physical Journal-Special Topics*, 224(17-18): 3119-3140.
- Captages, protection des captages destinés à l'alimentation en eau potable vis-à-vis des pollutions diffuses (s.d.). Périmètres de Protection et Aire d'Alimentation de Captage. [En ligne]. <http://captages.onema.fr/enjeu/la-protection-des-captages/lair-dalimentation-de-captage> (consulté le 4 mai 2016).
- Carlson G.F.Jr, Woodard F.E., Wentworth D.F. and Sproul O.J. (1968). Virus inactivation on clay particles in natural waters. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 40(2): R89-106.
- Communauté métropolitaine de Québec (2014). Protection des sources d'eau potable. [En ligne]. <http://www.cmquebec.qc.ca/eau/protection-sources-eau-potable> (consulté le 3 mai 2016).

- DeBorde D.C., Woessner W.W., Lauerman B., Ball P.N. (1998). Virus occurrence and transport in a school septic system and unconfined aquifer. *Ground Water*, 36(5): 825-834.
- DeBorde D.C., Woessner W.W., Kiley Q.T. and Ball P. (1999). Rapid transport of viruses in a floodplain aquifer. *Water Research*, 33(10): 2229–2238.
- Eau France, le service public d'information sur l'eau (s.d.). Protection des captages. [En ligne]. <http://www.eaufrance.fr/agir-et-participer/prevenir-les-risques/protection-des-captages> (consulté le 3 mai 2016).
- Gordon C. and Toze S. (2003). Influence of groundwater characteristics on the survival of enteric viruses. *J. Appl. Microbiol.*, 95(3): 536–544.
- Gouvernement de la Nouvelle-Écosse (1992). North Tyndal protected water area designation and regulations. Made under subsection 106(5) and (6) of the Environment Act. S.N.S. 1994-95, c. 1 September 16, 1992, N.S. Reg. 200/92. [En ligne]. <http://www.novascotia.ca/just/regulations/reg/envpwtyn.htm> (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement de la Nouvelle-Écosse (2004). Developing a municipal source water protection plan: a guide for water utilities and municipalities. Step 2. Delineate a source water protection area boundary. Nova Scotia Environment Water and Wastewater Branch. 16 p. [En ligne]. <http://www.novascotia.ca/nse/water/docs/waterprotectionplanstep2.pdf> (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement de la Nouvelle-Écosse (2014). Groundwater management. [En ligne]. <https://www.novascotia.ca/nse/groundwater/groundwatermagmt.asp#protection> (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement de l'Ontario (2006). Loi de 2006 sur l'eau saine, L.O. 2006, Chapitre 22, dernière modification : 2012. [En ligne]. <https://www.ontario.ca/fr/lois/loi/06c22> (consulté le 20 juillet 2016).
- Gouvernement de l'Ontario (2008). Technical Rules : Assessment Report, Clean Water Act, 2006, Amended on December 2, 2013. [En ligne]. <https://www.ontario.ca/page/technical-rules-assessment-report> (consulté le 20 juillet 2016).
- Gouvernement de l'Ontario (2016). Protection des sources. [En ligne]. <https://www.ontario.ca/fr/page/protection-des-sources> (consulté le 10 mai 2016).
- Gouvernement du Nouveau Brunswick (1990). Règlement du Nouveau-Brunswick 90-79 pris en vertu de la Loi sur l'assainissement de l'eau (D.C. 90-531), déposé le 29 juin 1990. [En ligne]. http://laws.gnb.ca/fr/showdoc/cr/90-79/ga:s_22#anchorga:s_22 (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement du Nouveau Brunswick (2000). Règlement du Nouveau-Brunswick 2000-47 pris en vertu de la Loi sur l'assainissement de l'eau (D.C. 2000-451), déposé le 12 septembre 2000. [En ligne]. <http://laws.gnb.ca/fr/showfulldoc/cr/2000-47//20160506> (consulté le 6 mai 2016).

- Gouvernement du Nouveau Brunswick (2002). Loi modifiant la Loi sur l'assainissement de l'eau. Assemblée législative du Nouveau-Brunswick. [En ligne]. <https://www.gnb.ca/legis/bill/editform-f.asp?ID=116&legi=54&num=4> (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement du Nouveau Brunswick (2004). Guide pour l'application des mesures d'assainissement en fonction des risques (RBCA, Risk-Based Corrective Action) dans les bassins hydrographiques et les champs de captage municipaux, Conformément aux Lignes directrices sur la gestion des lieux contaminés (Version 2.0), octobre 2004. Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux du Nouveau-Brunswick. 27 p. [En ligne]. http://www.atlanticrbca.com/wp-content/files_mf/1399897969nb_rbca_bassins_hydrographiques.pdf (consulté le 20 juillet 2016).
- Gouvernement du Nouveau Brunswick (2005). Protection des sources municipales d'eau potable. Survol du Programme de protection des champs de captage du Nouveau-Brunswick. 15 p. [En ligne]. <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/ProtectionSourcesMunicipalesEauPotable.pdf> (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement du Nouveau Brunswick (2016). L'Analyse des puits d'eau. [En ligne]. http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/services/services_renderer.3877.html#serviceDescription (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement du Nouveau Brunswick (2016). Environnement et Gouvernements locaux. [En ligne]. http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/contacts/dept_renderer.139.html (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement du Nouveau Brunswick (2016). Lois et règlements. [En ligne]. http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/procureur_general/lois_et_reglements.html (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement du Nouveau Brunswick (s.d.). Comprendre la loi : Survol du Décret de désignation du secteur protégé du champ de captage du Nouveau-Brunswick. [En ligne]. <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/SurvolDecretDesignationSecteurProtegeChamp.pdf> (consulté le 6 mai 2016).
- Gouvernement du Québec (2001). Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q-2, r.40), À jour au 1^{er} avril 2016, Éditeur officiel du Québec. [En ligne]. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2040/> (consulté le 20 juillet 2016).
- Gouvernement du Québec (2014), Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (chapitre Q-2, r. 35.2), À jour au 1^{er} avril 2016. [En ligne]. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2035.2/> (consulté le 20 juillet 2016).
- Jiang G., Noonan M. J., Buchan G. D., Smith N. (2007). Transport of *Escherichia coli* through variably saturated sand columns and modeling approaches. *Journal of Contaminant Hydrology*, 93(1-4): 2-20.

- John D.E. and Rose J.B. (2005). Review of factors affecting microbial survival in groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, 39(19): 7345–7356.
- Khan S. J., Deere D., Leusch, F. D. L., Humpage A., Jenkins M., Cunliffe D. (2015). Extreme weather events: Should drinking water quality management systems adapt to changing risk profiles? *Water research*, 85: 124-136.
- Keswick B.H. and Gerba C.P. (1980). Viruses in groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, 14(11): 1290–1297.
- Keswick B.H., Gerba C.P., Secor S.L., and Cech I. (1982). Survival of enteric viruses and indicator bacteria in groundwater. *J. Environ. Sci. Health A17*:903-912.
- Kozuskanich J.C., Novakowski K.S., Anderson B.C., Crowe A.S. and Balakrishnan V.K. (2014). Anthropogenic impacts on a bedrock aquifer at the village scale. *Groundwater*, 52(3): 474–486.
- Levison J., Novakowski K. (2009). The impact of cattle pasturing on groundwater quality in bedrock aquifers having minimal overburden. *Hydrogeology Journal*, 17(3): 559-569.
- Levison J.K. and Novakowski K.S. (2012). Rapid transport from the surface to wells in fractured rock: a unique infiltration tracer experiment. *J. Contam. Hydrol.*, 131(1–4): 29–38.
- Locas A., Barthe C., Margolin A.B. and Payment P. (2008). Groundwater microbiological quality in Canadian drinking water municipal wells. *Can. J. Microbiol.*, 54(6): 472–478.
- Marjolet, G., Artur, A. et Freslon, M. (s.d.). Périmètres de protection des captages d'eau souterraine dans le massif armoricain. Effets sur la qualité des eaux. 12 p. [En ligne]. http://hydrologie.org/ACT/CIC/CIC_3_223.pdf (consulté le 3 mai 2016).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2016). *Projet de stratégie de protection et de conservation des sources destinées à l'alimentation en eau potable*. [En ligne]. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/EAU/potable/strategie/index.htm> (consulté le 2 mai 2016).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (2002). *Stratégie de protection et de conservation des sources destinées à l'alimentation en eau potable, Document de consultation publique, Avril 2002*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 32 p. [En ligne]. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/EAU/potable/strategie/strategie.pdf> (consulté le 2 mai 2016).
- O'Connor, D.R. (2002), *Report of the Walkerton Inquiry ; Part One: A Summary*, Ontario Ministry of the Attorney General © Queen's Printer for Ontario.
- Pandey, Pramod K., Kass, Philip H., Soupir, Michelle L., Biswas, Sagor, Singh, Vijay P. (2014). Contamination of water resources by pathogenic bacteria. *AMB Express*, 4(51).

- Powell K.L., Taylor R.G., Cronin A.A., Barrett M.H., Pedley S., Sellwood J., Trowsdale S.A. and Lerner D.N. (2003). Microbial contamination of two urban sandstone aquifers in the UK. *Water Res.*, 37(2): 339–352.
- Rasmussen H., Rouleau A. and Chevalier S. (2006), Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine, document diffusé par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 311 pages.
- République Française (2007). Code de la santé publique, Article L1321-13. Modifié par Décret n°2007-49 du 11 janvier 2007 - art. 1 JORF 12 janvier 2007. [En ligne]. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000006909488&cidTexte=LEGITEXT000006072665&dateTexte=20160517&oldAction=rechCodeArticle&fastReqId=2004847578&nbResultRech=1> (consulté le 13 mai 2016).
- République Française (2010). Code de la santé publique, Article L1321-2. Modifié par LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 - art. 164. [En ligne]. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000022494740&cidTexte=LEGITEXT000006072665&dateTexte=20160517&oldAction=rechCodeArticle&fastReqId=522225282&nbResultRech=1> (consulté le 13 mai 2016).
- République Française (2013). L'eau potable en France. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. [En ligne]. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-preservation-de-la-ressource-en.html> (consulté le 3 mai 2016).
- République Française (2013). Protection d'aire d'alimentation de captage en eau potable contre les pollutions liées à l'utilisation de fertilisants et de pesticides, Guide méthodologique. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 103 p. [En ligne]. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_Methodo_aires_de_captage_-_assemblage_web.pdf (consulté le 3 mai 2016).
- Robertson J.B. (1997). Natural protection of spring and well drinking water against surface microbial contamination. I. hydrogeological parameters. *Crit. Rev. Microbiol.*, 23(2): 143–178.
- Scandura J.E. and Sobsey M.D. (1997). Viral and bacterial contamination of groundwater from on-site sewage treatment systems. *Water Sci. Technol.*, 35(11–12): 141–146.
- Schijven J.F. and Hassanizadeh S.M. (2000). Removal of viruses by soil passage: Overview of modeling, processes, and parameters. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 30(1): 49–127.
- Seitz S.R., Leon J.S., Schwab K.J., Lyon G.M., Dowd M., McDaniels M., Abdulhafid G., Fernandez M.L., Lindesmith L.C., Baric R.S. and Moe C.L. (2011). Norovirus infectivity in humans and persistence in water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 77(19): 6884–6888.

- Sorensen J. P. R., Lapworth D. J., Marchand B. P., Nkhuwa D. C. W., Pedley S., Stuart M. E., Bell R. A., Chirwa M., Kabika J., Liemisa M. and Chibesa M. (2015). In-situ tryptophan-like fluorescence: A real-time indicator of faecal contamination in drinking water supplies. *Water Research*, 81: 38-46.
- State of Maine (2016). Rules relating to drinking water, 10-144 Code of Maine Regulations, Chapter 231, Last amended: May 9, 2016. Department of Health and Human Services, Maine Center for Disease Control and Prevention, Division of Environmental Health, Drinking Water Program. 10-144 Code of Maine Regulations, chapter 231, last amended: May 9, 2016. [En ligne]. <http://www.maine.gov/dhhs/mecdc/environmental-health/dwp/pws/rulesPolicies.shtml> (consulté le 20 juillet 2016).
- State of Vermont, (2010). Environmental protection rules, chapter 21. Water supply rule. Agency of natural resources, Department of Environmental Conservation. Original Effective Date: September 24, 1992, Revision date : December 1, 2010. [En ligne]. <http://dec.vermont.gov/sites/dec/files/dwggwp/dwrules/pdf/vtwsr2010.pdf> (consulté le 7 mai 2016).
- State of Vermont, (2016). Drinking Water. Agency of Natural Resources, Department of Environmental Conservation. [En ligne]. <http://dec.vermont.gov/water/drinking-water> (consulté le 6 mai 2016).
- State of Vermont, (2016). Laws and regulations. Agency of Natural Resources, Department of Environmental Conservation. [En ligne]. <http://dec.vermont.gov/water/laws> (consulté le 6 mai 2016).
- Talbot Poulin, Marie-Catherine, Comeau, Guillaume, Tremblay, Yohann, Therrien, René, Nadeau, Marie-Michèle, Lemieux, Jean-Michel, Molson, John, Fortier, Richard, Therrien, Pierre, Lamarche, Lise, Donati-Daoust, François, Bérubé, S. Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013, 172 pages, 19 annexes, 28 cartes. [En ligne]. <http://rques-gries.ca/fr/archives-et-documents/rapports-memoires-et-cartes/265-paces-communaute-metropolitaine-de-quebec.html> (consulté le 3 mai 2016).
- U.S. Environmental Protection Agency (2002). Onsite wastewater treatment systems manual. Office of Water, Office of Research and Development. EPA/625/R-00/008 February 2002. 367 p. [En ligne]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/2004_07_07_septics_septic_2002_osdm_all.pdf (consulté le 15 juin 2016).
- Vernoux J.F., Barrez F., Wuilleumier A. (2011). Analyse des études de délimitation et de vulnérabilité des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine « Grenelle », rapport BRGM/RP- 59583 –FR, 87 pages, 54 illustrations, 1 annexe [En ligne]. http://captages.onema.fr/system/files/vernoux_et_al._2011_1.pdf (consulté le 4 mai 2016).
- Yates M.V., Gerba C.P. and Kelley L.M. (1985). Virus persistence in groundwater. *Appl. Environ. Microbiol.*, 49(4): 778–781.