

Santé environnement

Qualité de l'eau distribuée en banlieue parisienne et incidence des gastro-entérites aiguës

2002-2007

Loïc Rambaud, Abdelkrim Zeghnoun, Magali Corso, Pascal Beaudeau

Sommaire

Abréviations	2	5.4 Relation entre la turbidité et l'incidence des GEAm	42
1. Introduction	3	5.5 Recherche d'autres facteurs de risque	43
2. Objectifs de l'étude	5	5.5.1 Débit de la Marne	44
3. Matériels et méthodes	6	5.5.2 Turbidité de l'eau brute	45
3.1 Les secteurs d'étude	6	5.5.3 Nombre de particules de l'eau filtrée	46
3.1.1 Le secteur du Sedif-nord	6	5.5.4 Carbone organique de l'eau brute	47
3.1.2 Le secteur du Sedif-est	7	5.5.5 Débit produit	48
3.1.3 Le secteur du Sedif-sud	9	5.5.6 Température de l'eau traitée	49
3.2 Données et variables	9	5.5.7 Carbone organique de l'eau filtrée	50
3.2.1 Données environnementales	9	5.6 Modélisation multi-exposition	51
3.2.2 Données sanitaires	11	5.6.1 Construction du modèle	51
3.3 Le modèle statistique	12	5.6.2 Modélisation chez les enfants	51
3.4 Étude du rôle de la turbidité	13	5.6.3 Test du modèle chez les adultes	52
3.4.1 Définition du proxy d'exposition utilisé	13	6. Résultats - Secteur Sedif-sud	54
3.4.2 Latence et décalage de l'exposition	13	6.1 Qualité des données	54
3.5 Recherche d'autres facteurs de risque	13	6.2 Distribution des variables	54
3.5.1 Analyses mono-exposition	13	6.2.1 Incidence des GEAm	54
3.5.2 Analyses multi-exposition	14	6.2.2 Température de l'eau	55
4. Résultats - Secteur Sedif-nord	15	6.2.3 Eaux brutes	55
4.1 Qualité des données	15	6.2.4 Eaux traitées	57
4.2 Distribution des variables	16	6.3 Corrélation entre covariables	58
4.2.1 Incidence des GEAm	16	6.4 Relation entre la turbidité et l'incidence des GEAm	60
4.2.2 Température	16	6.5 Recherche d'autres facteurs de risque	61
4.2.3 Eaux brutes	17	6.5.1 Débit de la Seine	62
4.2.4 Eaux traitées	18	6.5.2 Turbidité de l'eau brute	63
4.3 Corrélation entre covariables	20	6.5.3 Carbone organique de l'eau brute	64
4.4 Relation entre la turbidité et l'incidence des GEAm	21	6.5.4 Débit produit	65
4.5 Recherche d'autres facteurs de risque	22	6.5.5 Température de l'eau traitée	66
4.5.1 Débit de l'Oise	23	6.5.6 Nombre de particules de l'eau filtrée	67
4.5.2 Turbidité de l'eau brute	24	6.5.7 Carbone organique de l'eau filtrée	68
4.5.3 Nombre de particules de l'eau filtrée	25	6.6 Modélisation multi-exposition	69
4.5.4 Carbone organique de l'eau brute	26	6.6.1 Construction du modèle	69
4.5.5 Débit produit	27	6.6.2 Modélisation chez les enfants	69
4.5.6 Température de l'eau traitée	28	6.6.3 Test du modèle chez les adultes	71
4.5.7 Proportion du débit issu de la filière biologique	29	7. Discussion : analyse des facteurs de risque de GEAm liés à l'eau du robinet	73
4.6 Modélisation multi-exposition	30	7.1 Le débit produit	73
4.6.1 Construction du modèle	30	7.2 Les particules plutôt que la turbidité	73
4.6.2 Modélisation chez les enfants	30	7.3 Des interactions significatives mais difficilement interprétables	74
4.6.3 Test du modèle chez les adultes	32	7.3.1 Rôle de la température de l'eau	74
5. Résultats - Secteur Sedif-est	35	7.3.2 Particules comptées dans l'eau traitée	75
5.1 Qualité des données	35	7.3.3 Débit de la ressource	75
5.2 Distribution des variables	36	7.3.4 Carbone organique total de l'eau brute	75
5.2.1 Incidence des GEAm	36	7.4 Niveau des risques observés	76
5.2.2 Température de l'eau	36	8. Conclusion	78
5.2.3 Eaux brutes	37	Références bibliographiques	79
5.2.4 Eaux traitées	39	Annexes	81
5.3 Corrélation entre covariables	41		

Qualité de l'eau distribuée en banlieue parisienne et incidence des gastro-entérites aiguës 2002-2007

Auteurs

Loïc Rambaud (rédaction), Institut de veille sanitaire (InVS)

Abdelkrim Zeghnoun (modélisation statistique), InVS

Magali Corso (préparation des données), InVS

Pascal Beaudeau (direction), InVS

Comité technique

Frédéric Bounoure (université de Rouen), Boris David (Veolia eau), Henriette De Valk (InVS), Jean Duchemin (Agence de l'eau Seine-Normandie), Matthieu Fournier (université de Rouen), Catherine Galey (InVS), Alain Le Tertre (InVS), Jean-François Loret (Suez environnement), Mathilde Pascal (InVS), Sylvie Thibert (Syndicat des eaux d'Ile-de-France, Sedif), Olivier Thomas (École des hautes études en santé publique, EHESP), Bénédicte Welte (Eaux de Paris).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Caisse nationale d'Assurance maladie (Cnam) pour la fourniture des données de santé, le Sedif pour la fourniture des données d'exploitation et Météo-France pour la fourniture des données météorologiques. Ils remercient également Catherine Galey pour la relecture de ce rapport.

Abréviations

BASF	Bactéries anaérobies sulfito-réductrices
CAG	Charbon actif en grain
COT	Carbone organique total
CTU	Classe thérapeutique utilisée
EB	Eaux brutes
EF	Eaux filtrées
ET	Eaux traitées
Erasme	Extraction, recherche et analyses pour un suivi médico-économique
GAM	Generalized Additive Model
GCV	Generalized Cross-Validation
GEA	Gastro-entérites aiguës
GEAm	Gastro-entérites aiguës médicalisées
Insee	Institut national de la statistique et des études économiques
MES	Matières en suspension
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
Sedif	Syndicat des eaux d'Ile-de-France
Spe115	Nombre quotidien de cas de GEAm chez les enfants entre 1 et 15 ans inclus
Spe16+	Nombre quotidien de cas de GEAm chez les adultes de 16 ans et plus
SISE-Eaux	Système d'information en santé environnement-Eaux

1. Introduction

En France, l'incidence des pathologies d'origine fécale a été considérablement réduite depuis le début du XX^e siècle. Même si leur recensement n'atteint pas l'exhaustivité, leur nombre est aujourd'hui probablement faible et leurs manifestations généralement bénignes. Les améliorations réalisées en matière de protection des ressources, de potabilisation de l'eau ou encore d'assainissement ont largement contribué à ce progrès sanitaire.

Lors du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine, les exploitants et laboratoires chargés des analyses utilisent des indicateurs microbiologiques qui, comme tous les indicateurs de qualité, possèdent des limites techniques. Ces indicateurs permettent d'alerter sur d'éventuelles contaminations de l'eau mais ne permettent pas d'apprécier correctement les niveaux de risque infectieux qui peuvent subsister après les opérations de désinfection. L'absence de ces indicateurs dans les eaux destinées à la consommation humaine ne permet pas d'exclure une contamination microbiologique de l'eau par des virus ou protozoaires.

Les personnes responsables de la production d'eau potable sont tenues par le code de la santé publique de fournir une eau propre à la consommation humaine et donc exempte d'agents pathogènes (articles L.1321-1 et suivants du code de la santé publique). La plupart des filières de traitement de l'eau n'ont cependant pas les capacités techniques de produire une eau totalement exempte de micro-organismes pathogènes. Les matières en suspension (MES), si elles ne sont pas éliminées avant la mise en distribution de l'eau, peuvent jouer le rôle de refuge pour certains micro-organismes et leur permettre de résister aux désinfections successives. De plus, les matières organiques, dont la présence est souvent associée aux MES, peuvent consommer prématurément le résiduel de désinfectant injecté dans les réseaux et contribuer ainsi à augmenter la probabilité de survie des micro-organismes. Le niveau de turbidité de l'eau mise en distribution, qui reflète la présence de MES, pourrait ainsi s'avérer être un bon estimateur de l'exposition des consommateurs d'eau au risque infectieux et un bon indicateur du risque de gastro-entérites aiguës (GEA) d'origine hydrique.

En 2010, une étude française montrait que l'incidence des GEA, définie par deux symptômes objectifs facilement identifiables que sont la diarrhée aiguë et le vomissement, était de 0,3 cas par personne et par an [1]. Après l'infection, ces symptômes se déclarent généralement avec une latence comprise entre un à dix jours. La sensibilité et la réactivité sont des qualités importantes qui font de la GEA un syndrome adéquat pour la surveillance épidémiologique des épidémies infectieuses d'origine hydrique. En France, les données de remboursement de médicaments prescrits pour le traitement d'une GEA permettent la construction d'un indicateur de l'incidence des GEA qui présente les qualités attendues pour l'épidémiologie des infections d'origine fécale et particulièrement pour l'étude d'un facteur de risque local tel que la consommation d'eau [2].

Le « bruit de fond » de l'incidence des GEA est largement méconnu et la part attribuable à l'eau de consommation n'est pas correctement évaluée en dehors du cas des petites adductions contrevenant fréquemment aux normes bactériologiques [3]. Certaines études, reposant sur des essais contrôlés, ont conclu à des risques attribuables de l'ordre de 10 à 40 % pour des eaux conformes aux standards communs [4;5] tandis que d'autres auteurs contestaient la validité des méthodes et avançaient des risques très inférieurs [6]. Du fait de leur rareté, les études temporelles disponibles sont insuffisantes à la quantification du risque endémique attribuable à la consommation d'eau.

L'étude turbidité et gastro-entérites pilotée par l'Institut de veille sanitaire (InVS) se propose d'évaluer le niveau de risque endémique des GEA lié à la consommation d'eau dans plusieurs villes françaises. Sur le plan méthodologique, l'analyse de séries chronologiques est un outil particulièrement adapté pour mettre en évidence un lien entre un indicateur de santé (nombre quotidien de GEA) et une ou plusieurs variables d'exposition (données de qualité de l'eau, données météorologiques ou autres). Cette étude vise ainsi à approfondir les relations entre le niveau de risque infectieux porté par l'eau de consommation et les données issues des systèmes d'exploitation d'eau, telles que les niveaux de turbidité ou le débit produit par exemple. Ces indicateurs présentent les avantages d'être mesurés en continu par les exploitants et de donner une valeur en temps réel autorisant la prise rapide de mesures correctives. Cette approche épidémiologique permet non seulement d'objectiver la réalité du risque endémique mais aussi d'approcher ses déterminants environnementaux ou techniques. Elle complète avantageusement l'approche microbiologique qui reste onéreuse et limitée pour les contaminations virales ou parasitaires.

Ce sixième volet de l'étude turbidité et gastro-entérites se focalise sur trois secteurs géographiques de la banlieue parisienne alimentés en eau par le Syndicat des eaux d'Ile-de-France (Sedif). Ce syndicat, créé en 1923, assure l'alimentation en eau de 149 communes d'Ile-de-France, soit un peu plus de 4 millions d'habitants. Les trois usines, situées à Méry-sur-Oise (95), Neuilly-sur-Marne (93) et Choisy-le-Roi (94), puisent leur eau au sein des trois principales rivières d'Ile-de-France : l'Oise, la Marne et la Seine. Leur exploitation a été confiée à la société Veolia Eau.

2. Objectifs de l'étude

L'étude turbidité et gastro-entérites est une étude multicentrique incluant onze villes ou agglomérations françaises. Le présent volet de cette étude se concentre sur la distribution d'eau par le Sedif dans trois secteurs géographiques de la banlieue parisienne, Sedif-nord, Sedif-est et Sedif-sud, desservis respectivement par les usines de Méry-sur-Oise, Neuilly-sur-Marne et Choisy-le-Roi.

Ce volet local de l'étude répond à plusieurs objectifs :

- étudier, pour chaque usine, la relation entre la turbidité de l'eau mise en distribution et le nombre de cas de GEA médicalisés (GEAm) observés sur le secteur géographique desservi ;
- explorer, pour chaque usine, le rôle d'autres facteurs de risque :
 - étudier les variables d'exploitation en tant que variables d'exposition et les latences associées à un effet sur l'incidence des GEAm ;
 - construire un modèle multi-exposition (contenant plusieurs *proxy* d'expositions) plausible à partir des données d'exploitation disponibles.

3. Matériels et méthodes

3.1. Les secteurs d'étude

3.1.1. Le secteur du Sedif-nord

Le secteur du Sedif-nord comprend 36 communes du nord de la banlieue parisienne (annexe 1) correspondant, selon l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee), à une population d'environ 673 000 habitants en 2006. Entre 2002 et 2007, ce secteur était exclusivement alimenté en eau par l'usine de Méry-sur-Oise (figure 1).

Cette usine fut construite au début du XX^e siècle. Elle a depuis été modernisée à plusieurs reprises pour que sa capacité maximale de production atteigne 340 000 m³/j en 1999. Sa production moyenne est d'environ 190 000 m³/j.

L'eau brute est pompée dans l'Oise. Elle est d'abord filtrée au travers d'une grille afin d'éliminer les objets flottants. Elle alimente ensuite un bassin de stockage d'environ 370 000 m³ qui permet, à ce stade, de réaliser une décantation naturelle et de constituer une réserve d'eau afin de sécuriser l'approvisionnement en cas de pollution intempestive de l'Oise.

L'usine de Méry-sur-Oise est divisée en deux filières parallèles :

- une filière biologique, constituée par :
 - une coagulation/floculation des matières en suspension au sel d'aluminium ;
 - une décantation des floccs au sein de décanteurs couloirs ;
 - une filtration sur sable afin d'éliminer les floccs non décantés par rétention sur le massif filtrant et l'ammoniaque par biodégradation ;
 - d'une étape d'ozonation permettant de détruire les virus et bactéries restantes et de casser les molécules organiques dans le but de les rendre biodégradables. L'objectif de l'usine est d'atteindre 3 logs d'abattement de cystes de *Giardia* en permanence par toute la filière ;
 - d'une filtration biologique sur charbon actif en grains (CAG) permettant de retenir et de dégrader les molécules organiques restantes ;
 - d'une chloration suivie d'un stockage permettant un temps de contact d'au moins deux heures.

- et une filière membranaire, constituée par :
 - une coagulation/floculation des matières en suspension au sel d'aluminium ;
 - une décantation des floccs au sein de décanteurs lamellaires à floccs lestés de type Actiflo ;
 - une filtration sur sable et anthracite qui s'opère dans dix bassins filtrants. Cette étape de filtration permet d'éliminer les floccs non décantés par rétention sur le massif filtrant et l'ammoniaque par biodégradation ;
 - d'une nanofiltration sous pression (entre 8 et 15 bars) permettant de retenir les éléments de taille supérieure à 1 nanomètre ;
 - d'un dégazage afin d'éliminer le gaz carbonique créé par la rétention du calcium lors de la nanofiltration ;
 - d'une désinfection aux rayons ultra-violetts ;
 - d'un rééquilibrage du pH *via* adjonction de soude visant à obtenir une eau légèrement incrustante.

Ces deux filières ont été dimensionnées de manière à être en capacité de produire chacune la totalité des besoins en eau du secteur desservi par l'usine. Habituellement, la filière biologique sert seulement d'appoint. Elle est maintenue à un débit minimum journalier de 30 000 m³/j afin d'être en capacité de prendre le relais sur la filière membranaire à tout moment.

L'eau mise en distribution est un mélange des eaux produites par chacune des deux filières à raison de 80 % provenant de la filière membranaire et 20 % de la filière biologique. L'ajout de chlore dans l'eau de la filière biologique est calculé de façon à ce que le résiduel de chlore de l'eau du mélange se maintienne à un niveau de 0,3 mg/l jusqu'à sa consommation.

Cette eau est finalement acheminée vers un réservoir tampon avant d'être mise en distribution. Le réseau de distribution comprend 12 réservoirs d'une capacité totale de 125 000 m³ et 12 stations de surpression. Le temps de séjour dans le réseau avant consommation est estimé en moyenne entre 0 et 2 jours selon la distance par rapport à l'usine.

3.1.2. Le secteur du Sedif-est

Le secteur du Sedif-est comprend 26 communes de l'est de la banlieue parisienne (annexe 1) correspondant, selon l'Insee, à une population d'environ 874 000 habitants en 2006. Entre 2002 et 2007, ce secteur était exclusivement alimenté en eau par l'usine de Neuilly-sur-Marne (figure 1).

Cette usine fut construite à la fin du XIX^e siècle et a été modernisée à plusieurs reprises depuis. Elle est aujourd'hui l'une des plus grandes usines d'eau potable du monde avec une production moyenne de 400 000 m³/j. Elle peut, si nécessaire, doubler cette production afin d'assurer le secours de l'usine de Choisy-le-Roi ou de Méry-sur-Oise.

Après le pompage de l'eau en Marne, un dégrillage et un tamisage écarte tous les objets flottants. La clarification de l'eau est ensuite réalisée au moyen d'une filière biologique classique, constituée :

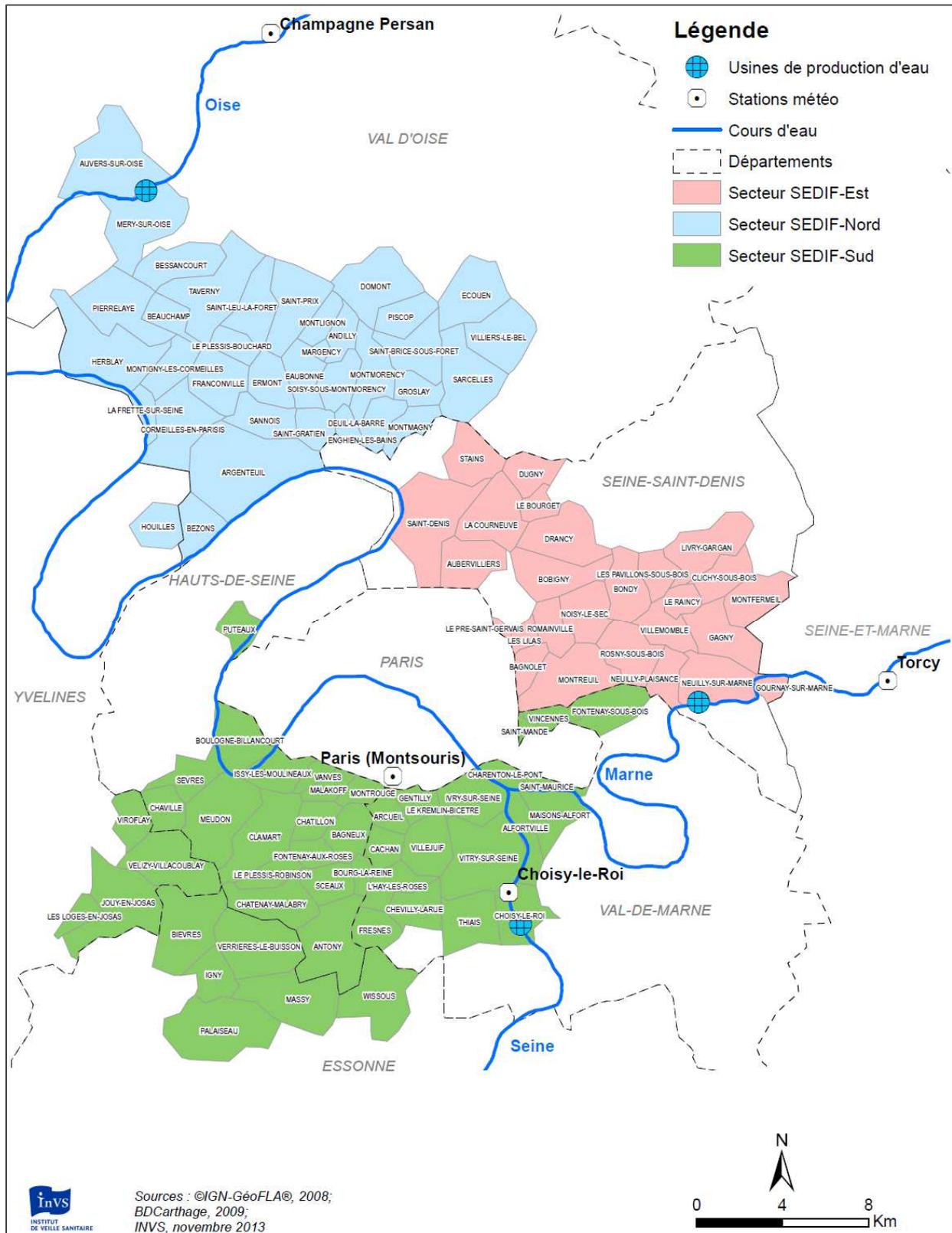
- d'une étape de coagulation/floculation utilisant des sels d'aluminium ;
- d'une étape de décantation au moyen de 4 décanteurs couloirs dans lesquels l'eau circule lentement, ou d'un cinquième décanteur de type Actiflo, permettant une décantation rapide aux moyens de lamelles obliques ;
- d'une filtration rapide sur sable (48 filtres) permettant de retenir les dernières particules en suspension et d'éliminer l'ammoniaque par biodégradation.

Une étape d'ozonation permet ensuite de désinfecter l'eau et de réduire la taille des grosses molécules organiques afin de les rendre biodégradables. L'objectif de l'usine est d'atteindre 3 logs d'abattement de cystes de *Giardia* en permanence par toute la filière.

L'eau est ensuite filtrée sur charbon actif en grain (12 filtres) afin d'éliminer la pollution organique restante par rétention ou par biodégradation. Elle est chlorée et acheminée vers un réservoir tampon afin d'assurer un temps de contact de quelques heures. L'eau est enfin injectée dans le réseau de distribution comprenant 11 réservoirs d'une capacité totale de 260 000 m³. Plusieurs points de rechloration permettent de maintenir le résiduel de chlore à un niveau moyen de 0,3 mg/l en tout point du réseau. Le temps de séjour dans le réseau varie entre 0 et 2 jours selon la distance par rapport à l'usine.

I Figure 1 I

Situation géographique des trois secteurs d'étude du Sedif



3.1.3. Le secteur Sedif-sud

Le secteur du Sedif-sud comprend 47 communes du sud de la banlieue parisienne (annexe 1) correspondant, selon l'Insee, à une population de plus 1 425 000 habitants en 2006. Entre 2002 et 2007, ce secteur était exclusivement alimenté en eau par l'usine de Choisy-le-Roi (figure 1).

L'usine Edmond Pépin de Choisy-le-Roi fut construite à la fin du XIX^e siècle et a été modernisée à plusieurs reprises depuis. Elle est l'une des plus grandes usines d'eau potable du monde avec une production moyenne de 400 000 m³/j. Elle peut, si nécessaire, doubler cette production afin d'assurer le secours de l'usine de Neuilly-sur-Marne ou de Méry-sur-Oise.

Après le pompage de l'eau en Seine, un dégrillage et un tamisage élimine les objets flottants. L'eau subit ensuite une pré-ozonation dont le but est de détruire les molécules organiques et de les rendre biodégradables. La clarification de l'eau est ensuite réalisée selon une filière classique, constituée :

- d'une coagulation/floculation aux sels d'aluminium ;
- d'une décantation lente sur 5 décanteurs couloirs permettant de retenir les plus gros floccs de matières en suspension ;
- d'une filtration rapide sur sable (45 filtres) permettant de retenir le reste de la matière en suspension et d'éliminer l'ammoniaque par biodégradation.

Une étape d'ozonation permet ensuite de désinfecter l'eau et de réduire la taille des grosses molécules organiques afin de les rendre biodégradables. L'objectif de l'usine est d'atteindre 3 logs d'abattement de cystes de *Giardia* en permanence sur toute la filière.

L'eau est ensuite filtrée sur charbon actif en grain (21 filtres) afin d'éliminer la pollution organique restante par rétention ou biodégradation. Elle est chlorée et mise en réservoir tampon afin d'assurer un temps de contact de quelques heures. L'eau est enfin acheminée dans le réseau de distribution comprenant 19 réservoirs d'une capacité totale de 290 000 m³ et 27 stations de surpression. Plusieurs points de rechloration permettent de maintenir constant le résiduel de chlore à un niveau moyen de 0,3 mg/l en tout point du réseau. Le temps de séjour dans le réseau varie entre 0 et 2 jours selon la distance par rapport à l'usine.

3.2. Données et variables

Pour chaque secteur étudié, les données disponibles couvrent la période du 1^{er} janvier 2002 au 30 juin 2007, soit un total de 2 007 jours. Les variables utilisées ont toutes été construites sur l'ensemble de cette période au pas de temps quotidien (tableau 1).

3.2.1. Données environnementales

Sauf exception mentionnée dans les paragraphes suivants, les données environnementales ont été fournies par le Sedif.

3.2.1.1. Turbidité des eaux brutes, filtrées et traitées

Au sein de chaque usine, la turbidité était mesurée en trois points sur le parcours de l'eau : sur les eaux brutes, sur les eaux après filtration sur sable (pour la filière biologique sur le site Sedif-nord) et sur les eaux traitées (en fin de production). Trois variables turbidité ont ainsi été créées pour chaque usine.

I Tableau 1 I

Intitulé des variables environnementales utilisées sur chaque secteur d'étude

Intitulé de la variable	Unité	Libellé
Cas de GEAm enfant	nb/j	Nombre de cas de gastro-entérites médicalisés chez les 1-15 ans
Cas de GEAm adulte	nb/j	Nombre de cas de gastro-entérites médicalisés chez les 16 ans et plus
Température de l'eau	°C	Température moyenne de l'eau traitée
Débit de la ressource	m ³ /s	Débit quotidien de chaque ressource
Débit produit	m ³ /j	Débit quotidien produit par chaque usine
Turbidité de l'eau brute	NTU	Turbidité moyenne quotidienne de l'eau de la ressource
Turbidité de l'eau filtrée	NTU	Turbidité moyenne quotidienne de l'eau après filtration sur sable
Turbidité de l'eau traitée	NTU	Turbidité moyenne quotidienne de l'eau après traitement complet
Nombre de particules	nb/ml	Nombre moyen quotidien de particules dans l'eau après filtration sur sable
COT de l'eau brute	mg/l	Carbone organique total moyen quotidien de l'eau de la ressource
COT de l'eau filtrée*	mg/l	Carbone organique total moyen quotidien de l'eau après filtration sur CAG
Volume d'eau filtrée**	%	Proportion quotidienne d'eau produite par la filière biologique

* variable non disponible pour le site Sedif-nord, ** variable uniquement disponible pour le site Sedif-nord.

Les valeurs moyennes et maximums de turbidité des eaux brutes, filtrées et traitées ont été fournies sur un pas de temps quotidien. Seules les moyennes ont été utilisées du fait d'absence de résultats probants avec les maximums dans les précédents volets de l'étude turbidité et gastro-entérites [7;8]. Les mesures de turbidité étaient exprimées en NTU sur l'ensemble de la période d'étude. Débits des ressources

Les débits des ressources étaient mesurés par l'exploitant à proximité des points de captage respectifs pour chaque usine. Toutes les valeurs de débits ont été fournies sur un pas de temps quotidien, après corrections éventuelles et validation par l'exploitant.

3.2.1.2. Débits produits

Les débits produits ont été mesurés à la sortie de chaque usine. Les valeurs correspondent aux quantités d'eaux mises en distribution, c'est-à-dire injectées par chaque usine dans le réseau de distribution qui dessert, dans chaque cas, un secteur plus large que le secteur étudié.

3.2.1.3. Températures

Les variables de température des eaux mises en distribution ont été produites par les exploitants pour chaque site étudié. Elles étaient fournies sous la forme d'une moyenne quotidienne sur l'ensemble de la période d'étude. Du fait de la disponibilité des températures de l'eau, la température de l'air qui était fournie par météoFrance n'a pas été utilisée car jugée moins représentative de l'exposition.

Les variables précipitations, disponibles pour chacun des 3 sites, n'ont pas été incluses aux analyses du fait du peu de résultats probants lors des précédents volets de l'étude [7;8].

3.2.1.4. Nombre de particules

Les mesures du nombre de particules étaient réalisées à la sortie des filtres à sable dans chacune des usines, excepté à la sortie de la filière membranaire de l'usine de Méry-sur-Oise. Les compteurs sont

utilisés dans le but de vérifier les performances des étapes de clarification. Selon l'exploitant, leur utilisation est plus appropriée que celle des turbidimètres car ils permettent d'atteindre des niveaux de sensibilité plus fins et permettent également d'avoir une information complémentaire par rapport aux mesures de turbidité. Les compteurs mesurent le nombre de particules dont la taille est comprise entre 1,5 et 15 μm . Il n'y a pas de différenciation possible entre les comptages de bactéries ou d'algues microscopiques.

3.2.1.5. Carbone organique total

Les mesures de carbone organique total (COT) étaient réalisées en deux points sur le parcours de l'eau dans les usines des sites Sedif-est (Neuilly-sur-Marne) et Sedif-sud (Choisy-le-Roi) : sur l'eau brute et sur l'eau après filtration sur CAG en fin de traitement de clarification. Seules les mesures sur l'eau brute ont été utilisées pour le site du Sedif-nord (Méry-sur-Oise) du fait d'un grand nombre de données quotidiennes absentes sur l'eau produite (les mesures sont moins pertinentes du fait de la mise en œuvre de la nanofiltration et des niveaux de COT très faibles atteints).

3.2.1.6. Volume d'eau filtrée à Méry-sur-Oise

Cette variable représente la proportion quotidienne d'eau produite par la filière biologique au sein de l'usine de Méry-sur-Oise qui présente également une filière par nanofiltration. Cette variable est spécifique au secteur du Sedif-nord.

3.2.1.7. Indicateurs de contamination microbiologiques

Les prélèvements pour analyse microbiologique des eaux brutes ont été réalisés à l'arrivée des eaux dans chaque usine. Les paramètres mesurés étaient les coliformes totaux, coliformes fécaux, entérocoques et les spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices (BASF). Aucun prélèvement n'a été réalisé les jours de week-end ou jours fériés, entraînant un nombre élevé de valeurs absentes. De ce fait, ces données n'ont été utilisées que pour réaliser une analyse descriptive de la qualité microbiologique des eaux brutes.

3.2.2. Données sanitaires

Deux indicateurs de santé ont été produits à partir des données de remboursements de médicaments extraites de la base Erasme et fournies par l'Assurance maladie [2;9]. L'indicateur spe115 estime le nombre quotidien de cas de GEAm chez les enfants âgés de 1 à 15 ans inclus. Il a été utilisé pour la construction du modèle car jugé plus sensible du fait d'une incidence des GEAm plus élevée chez les enfants par rapport aux adultes [1]. L'indicateur spe16+ comprends les cas adultes âgés de 16 ans et plus. Il a été utilisé comme élément de validation du modèle. L'expérience montre en effet que l'effet modificateur de l'âge sur le modèle est faible. Dans la plupart des sites étudiés, le modèle chez les adultes est le même que chez les enfants (formes similaires des fonctions de risque) mais avec des niveaux de risque relatif généralement plus faibles. A contrario, le constat d'une différence structurelle entre modèle enfants et modèle adultes est un argument en défaveur de la stabilité du modèle.

Les cas de GEAm âgés de moins d'un an n'ont pas été inclus dans l'étude du fait des incertitudes pesant sur leur consommation d'eau du robinet.

L'estimation des cas de GEAm à partir des ordonnances comprend 2 étapes. Dans une première étape, chaque ordonnance sur laquelle figurait au moins l'un des médicaments habituellement utilisés dans le traitement des GEAm a été extraite de la base. Les classes thérapeutiques utilisées

comprenaient les ralentisseurs du transit intestinal, les produits microbiens anti-diarrhéique, les anti-infectieux intestinaux, les antiémétiques et les absorbants intestinaux. Ces ordonnances ont ensuite été traitées automatiquement par un algorithme discriminant celles correspondant à des cas de GEA de celles relevant d'autres pathologies [2]. Cet algorithme se fonde d'une part sur l'occurrence, dans l'ordonnance, de médicaments ou d'associations médicamenteuses spécifiques au traitement des GEA (critères d'inclusion) et à d'autres pathologies (critères d'exclusion), et d'autre part sur le délai entre le jour de prescription et le jour de délivrance des médicaments (moins de 2 jours pour les cas de GEA).

La définition de cas utilisée correspond à la définition la plus spécifique des deux définitions possibles proposées par Beaudéau, *et al.* en 2006 [9]. Celle-ci est restreinte aux ordonnances contenant un antiseptique intestinal ou un antiémétique. Elle présente un taux d'incidence national moyen et une saisonnalité similaires à celle des indicateurs fournis par le réseau des médecins sentinelles [10].

3.3. Le modèle statistique

Les données de l'indicateur sanitaire, exprimant le nombre de cas quotidiens de GEAm, sont supposées provenir d'un processus de Poisson non stationnaire surdispersé. Un modèle de régression de Poisson est utilisé pour étudier la relation à court terme entre l'indicateur sanitaire et les *proxys* d'exposition (turbidité, débit produit, etc. (tableau 1)) en prenant en compte l'effet des facteurs de confusion (variables de contrôle) qui peuvent interférer dans la quantification de cette relation, à savoir la tendance, la saisonnalité, les jours de la semaine, les jours fériés, les vacances scolaires de la zone et la température de l'eau [11]. L'ajustement du modèle a été réalisé avec les seuls facteurs de confusion de manière à minimiser l'autocorrélation résiduelle et à obtenir des résidus assimilables à un bruit blanc. Les variables d'exposition étaient ensuite introduites dans le modèle ajusté. Les données manquantes étaient considérées en tant que telle et ne subissaient pas de traitement particulier.

L'analyse utilise des fonctions de régression *spline* pénalisées pour prendre en compte un éventuel effet non linéaire des covariables. Pour tester la forme de la relation entre le nombre de cas de GEAm et les indicateurs d'exposition, des fonctions *spline* à 3 degrés de liberté ont été utilisées. Ces fonctions permettent d'appréhender sans *a priori* la forme de la relation entre le nombre de cas de GEAm et les variables explicatives [11].

L'analyse statistique a été réalisée en utilisant le package *mgcv* du logiciel R. Le modèle exprime le logarithme népérien de l'espérance journalière du nombre de cas de GEAm en fonction des variables explicatives (de contrôle et d'exposition). L'équation du modèle est du type :

$$Y_t \sim P(\mu_t) \quad \text{et} \quad \mu_t = E[Y_t]$$

$$\ln(\mu_t)_t = \sum_{j=1}^k \beta_j z_{ij} + \sum_{j=1}^p f_j(x_{ij})$$

Où Y_t est le nombre de cas de GEAm au jour t ($t = 1, 2, \dots, T$), μ_t est l'espérance de Y_t . Les β_j sont les paramètres à estimer, z_{ij} sont les variables explicatives exprimées de façon linéaire dans le modèle (jours de la semaine, jours fériés et vacances scolaires...), x_{ij} sont les variables explicatives exprimées avec des fonctions *spline* f_j (tendance/saison, indicateurs d'exposition).

3.4. Étude du rôle de la turbidité

Le premier objectif de ce volet de l'étude est de tester le rôle de la turbidité des eaux consommées dans l'apparition des GEAm sur la zone d'étude. Dans un premier temps, le modèle statistique a été construit en intégrant uniquement la turbidité comme variable d'exposition, en plus des variables de contrôle permettant de tenir compte des facteurs de confusion (dont la température de l'eau produite).

3.4.1. Définition du *proxy* d'exposition utilisé

Pour chaque site étudié, la variable turbidité des eaux traitées n'était pas utilisable car presque constante sur la période d'étude. Ainsi, c'est la moyenne quotidienne de la turbidité des eaux filtrées qui a été choisie comme *proxy* de l'exposition. Elle reflète une exposition moyennée sur une journée. Les précédents résultats montrent que la moyenne quotidienne est mieux corrélée que le maximum horaire à l'incidence des GEAm [8;12].

3.4.2. Latence et décalage de l'exposition

Selon le Sedif, le temps entre la production de l'eau et sa consommation (moment de l'exposition) varie entre 0 et 2 jours. Il a été fixé arbitrairement à 1 jour en moyenne pour chaque site étudié.

La période d'incubation moyenne d'une infection après ingestion d'eau dure entre 1 et 10 jours mais peut s'étendre jusqu'à 20 jours. Les infections virales sont les plus rapides avec un temps d'incubation très court allant de quelques heures à une ou deux journées alors que les durées d'incubation parasitaires sont les plus longues et peuvent durer plusieurs semaines [13]. Les résultats obtenus dans les précédents volets de l'étude turbidité et gastro-entérites suggèrent que le mode de la durée d'incubation se situe entre 4 et 6 jours.

Le délai de consultation d'un médecin après l'apparition des symptômes d'une GEA a été estimé à 1 jour (entre 0 et 2 jours).

Au final, il est plausible d'attendre un pic de la réponse au septième jour (respectivement 1+5+1 jours) après la production de l'eau. Pour tenir compte d'une probable variabilité dans le délai de réponse et stabiliser son effet, le *proxy* d'exposition a été moyenné sur trois journées successives et centré sur le septième jour (moyennes des valeurs quotidiennes des *lags* 6 à 8).

3.5. Recherche d'autres facteurs de risque

Dans une seconde étape, la plupart des covariables d'exposition disponibles ont été explorées afin d'analyser leur relation avec l'incidence des GEAm et de caractériser la latence d'un effet potentiel. Les résultats obtenus ont permis la construction d'un modèle multi-exposition incluant uniquement les covariables ayant un effet plausible sur l'incidence des GEAm.

3.5.1. Analyses mono-exposition

Les covariables d'exposition ont été introduites à tour de rôle dans le modèle statistique incluant les variables de contrôle. Les tests portaient sur l'association entre le nombre de cas de GEAm au jour j

et l'une des covariables d'exposition sur un des quinze jours précédents, soit entre j et $j-15$. La significativité des associations était obtenue par la réalisation du test de Fischer.

La sensibilité des résultats aux valeurs extrêmes des covariables d'exposition a été examinée grâce à l'utilisation de deux jeux de données pour chaque covariable, l'un contenant l'ensemble des valeurs (p100) et l'autre contenant seulement les valeurs inférieures à leur percentile 98 (p98). Les résultats étaient analysés à partir des critères statistiques et de plausibilité suivants :

- la significativité de l'association (seuil retenu à $p \leq 0,05$) ;
- la cohérence de la forme de la fonction de réponse sur un ensemble de décalages temporels consécutifs (significativité et conservation des formes). La portée de ce critère peut être limitée par l'autocorrélation de la variable testée ;
- la robustesse de la fonction de réponse aux valeurs extrêmes de la covariable d'exposition considérée ;
- l'adéquation entre la forme de la relation observée et la forme attendue. Pour la turbidité, une forme croissante monotone de la relation était attendue car celle-ci est censée exprimer une dégradation de la qualité de l'eau. Les résultats précédemment acquis nous permettent d'attendre une forme partiellement croissante pour le débit produit (en « U » avec une branche droite dominante) et une forme partiellement décroissante pour la température de l'eau (en « U » avec une branche gauche dominante) ;
- une latence de la réponse en cohérence avec les délais de distribution de l'eau, des durées d'incubation des GEA et de consultation d'un médecin.

3.5.2. Analyses multi-exposition

Le modèle multi-exposition retenu *in fine* a été construit sur l'indicateur sanitaire spe115. Sur la base des résultats obtenus lors des analyses mono-exposition (paragraphe 3.5.1), une sélection des covariables pertinentes a été réalisée pour construire le modèle. Plusieurs interactions entre covariables ont été testées pour optimiser la modélisation. Pour la présentation des résultats, le modèle le plus convaincant a été choisi sur les critères de significativité des covariables et des tenseurs (interaction entre covariables), de variance expliquée, qui doit être maximale, ainsi qu'à partir du score GCV (Generalized Cross-Validation), qui doit être le plus faible possible.

Le modèle retenu a ensuite été validé en substituant l'indicateur sanitaire spe115 par l'indicateur sanitaire spe16+. La conséquence attendue de cette manipulation était la mise en évidence d'un risque de type similaire, d'un niveau éventuellement différent mais sans stricte modification de la forme des relations et/ou de la significativité des associations.

Les paramètres du modèle final, intégrant les variables d'exposition retenues, sont présentés en annexes 2, 3 et 4 pour chacun des secteurs de l'étude.

4. Résultats du secteur Sedif-nord

4.1. Qualité des données

Les deux indicateurs sanitaires présentent 3,1 % de données manquantes, dont un mois complet en juin 2004 (tableau 2). L'indicateur spe115 présente 9 valeurs nulles dont 6 apparaissent un dimanche. L'indicateur spe16+ présente 6 valeurs nulles dont 3 apparaissent un dimanche. Le nombre moyen de cas de GEAm est 1,8 fois plus élevé chez les adultes que chez les enfants. Les données du recensement de la population 2006 (Insee, 2006) laissent apparaître un ratio adultes/enfants de 3,6.

La variable température de l'eau présente 8 valeurs manquantes, soit 0,4 % des données. Les débits de l'Oise et de l'eau produite par l'usine de Méry-sur-Oise sont renseignés sur l'ensemble de la période d'étude et ne présentent aucune valeur nulle.

I Tableau 2 I

Caractéristiques des distributions des variables utilisées sur le secteur Sedif-nord

Variables	Unité	Valeurs manquantes (%)	Valeurs nulles (%)	Moyenne	Écart-type	Percentiles							
						Min	10	25	50	75	90	98	Max
cas GEAm 1-15 ans	nb/j	3,1	0,5	41	31	0	5	19	36	55	79	130	217
cas GEAm 16 et +		3,1	0,3	75	58	0	8	37	68	97	138	232	504
Température eau	°C	0,4	0	14,0	6,2	1,9	5,8	8,7	14	19,6	22,2	24,6	27,2
Débit Oise	m ³ /s	0	0	101,2	78,3	20	34	46	79	122	213	318	542
Débit Produit	m ³ /j x 100	0	0	193,6	29,6	59,9	158,0	168,2	196,8	215,6	231,1	248,0	320,1
Volume EF	%	0	0	33,6	5,7	21,7	27,6	29,7	32,7	36,5	41,0	47,9	99,8
Turbidité EB		0,9	0	20	16	5	9	11	15	21	35	76	147
Turbidité EF	NTU	0,5	0	0,06	0,01	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,13
Turbidité ET		0,2	0	0,04	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05
Particules EF	nb/ml	1,3	0	280	236	53	106	147	198	333	569	902	3 000
COT EB	mg/l	7,8	0	4,1	1	2,7	3,3	3,5	3,8	4,4	5,5	7	9,7

EB : eau brute ; EF : eau filtrée ; ET : eau traitée.

Les chroniques de turbidité de l'eau brute, de l'eau filtrée sur sable et de l'eau traitée présentent respectivement 0,9 %, 0,5 % et 0,2 % de données manquantes. La variable COT de l'eau brute est celle qui présente le plus grand nombre de données manquantes (7,8 %).

4.2. Distribution des variables

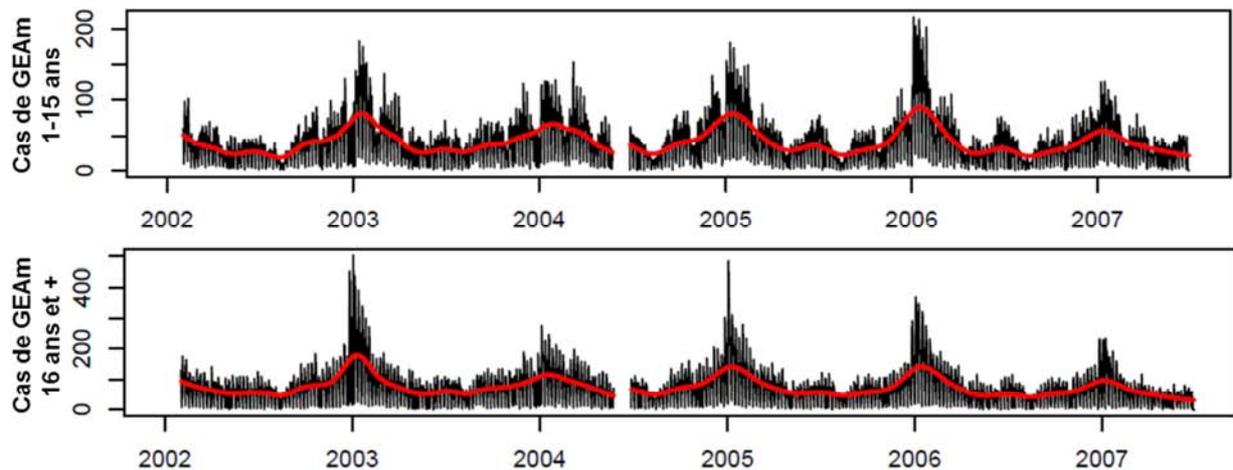
4.2.1. Incidence des GEAm

La série chronologique du nombre de cas de GEAm chez les 1-15 ans suit les pics hivernaux des épidémies de gastro-entérites (figure 2). Le maximum de 217 cas de GEAm a été observé le 5 janvier 2006 et correspond à environ 5,3 fois le nombre de cas moyen sur l'ensemble de la chronique.

Chez les adultes, le maximum de 504 cas de GEAm a été observé le 3 janvier 2003. Il correspond à 6,7 fois la valeur moyenne de cas de GEAm. Les épidémies hivernales de 2003, 2005 et 2006 ont été particulièrement marquées. Ces résultats sont comparables à ceux observés sur les autres sites situés en Ile-de-France sur la même période [14;15].

I Figure 2 I

Nombre de cas quotidiens de GEAm résidants sur le secteur Sedif-nord, 2002-2007

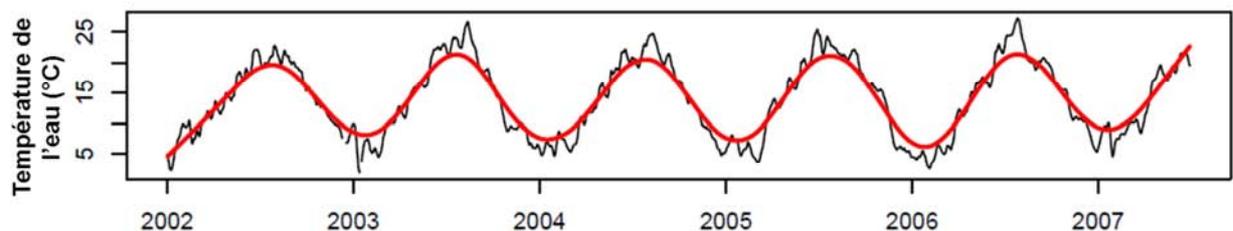


4.2.2. Température

Sur la période 2002-2007, la température moyenne de l'eau traitée par l'usine de Méry-sur-Oise présente les variations régulières liées à la saisonnalité (figure 3). Le maximum de température de l'eau de 27,2 °C était mesuré les 26 et 27 juillet 2006 et le minimum de 1,9 °C le 13 janvier 2003.

I Figure 3 I

Série temporelle de la température de l'eau traitée par l'usine de Méry-sur-Oise, 2002-2007



4.2.3. Eaux brutes

Les données d'autocontrôle de l'usine de Méry-sur-Oise ont été utilisées afin d'évaluer la qualité microbiologique de l'eau de l'Oise sur la période 2002-2007. Les paramètres coliformes totaux, coliformes fécaux, entérocoques et spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices ont été retenus afin d'évaluer d'une part le niveau de contamination microbiologique général et d'autre part le niveau de contamination microbiologique d'origine fécale (tableau 3).

Le niveau de contamination moyen par les coliformes fécaux est de 1 603 UFC/100 ml et celui des entérocoques est deux fois moindre (713 UFC/100 ml). L'Oise présente un niveau de contamination microbiologique général assez faible avec 6 204 UFC/100 ml de coliformes totaux et un p98 à 24 217 UFC/100 ml.

I Tableau 3 I

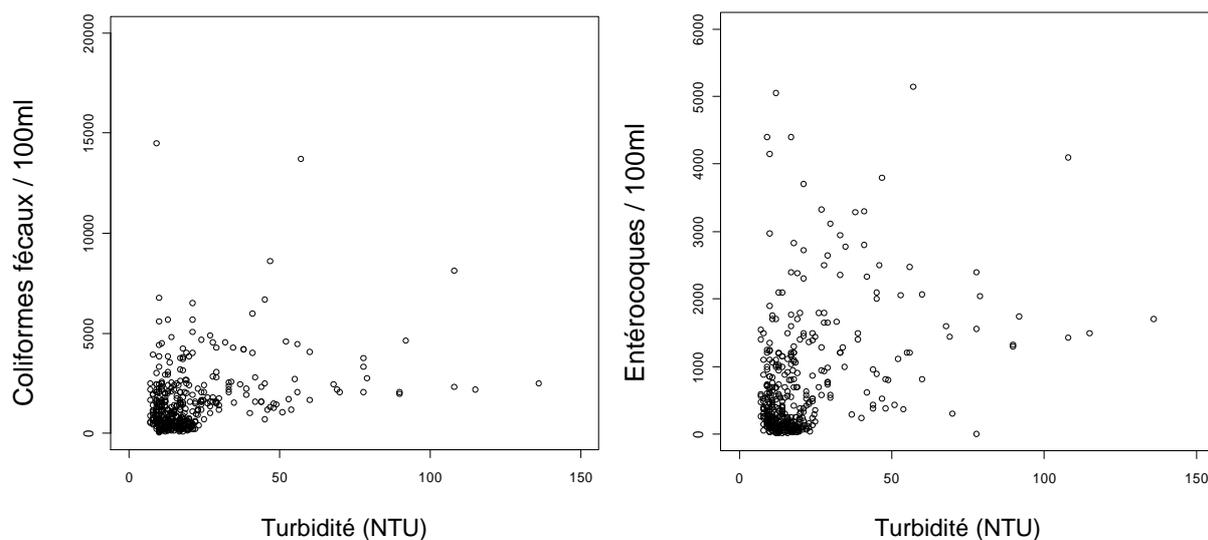
Distribution de la contamination microbiologique de l'Oise à Méry-sur-Oise, 2002-2007

Paramètre	Nombre d'analyses	Moyenne	Écart-type	Min	Percentiles						
					10	25	50	75	90	98	Max
Coliformes totaux/100ml	433	6 204	8 402	0	1 200	2 080	3 700	7 290	14 000	24 217	124 000
Coliformes fécaux/100ml	431	1 603	2 434	0	255	488	1 090	2 040	3 320	5 820	39 800
Entérocoques/100ml	432	713	929	0	72	129	360	998	1 710	3 471	8 400
Spores BASF/100ml	427	183	196	0	40	65	120	213	405	727	2 000

Les analyses de régression réalisées ne montrent pas de corrélation entre le niveau de turbidité de l'Oise et le niveau de contamination microbiologique d'origine fécale (figure 4).

I Figure 4 I

Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes de l'Oise à Méry-sur-Oise en fonction de la turbidité, période 2002-2007.



$$r = 0,20 ; IC_{95\%} = [0,10 - 0,29]$$

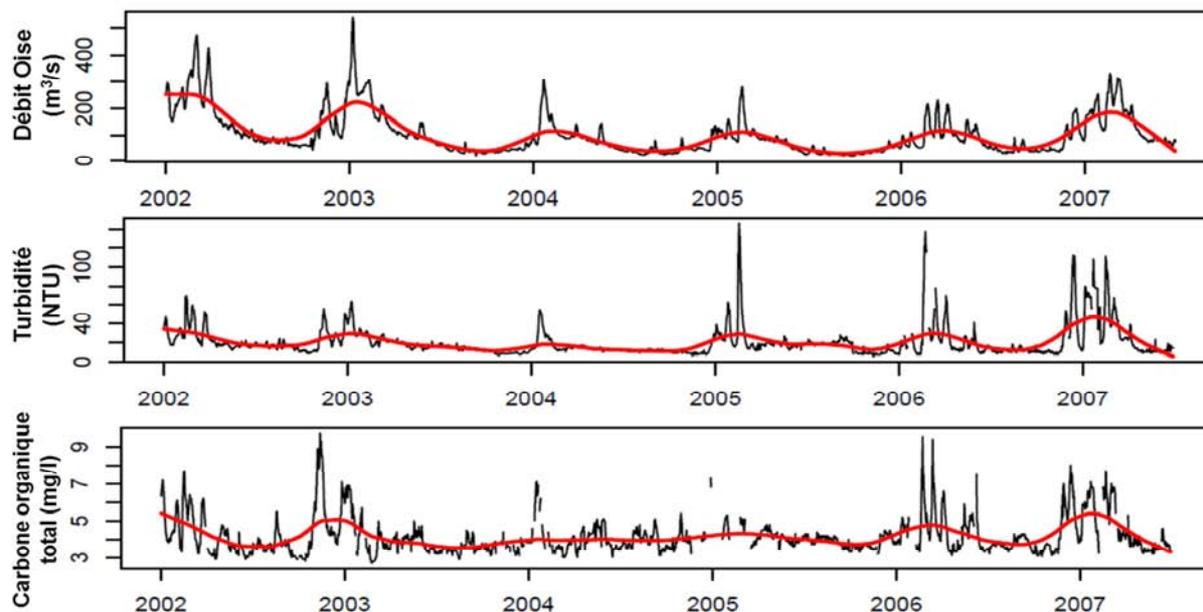
$$r = 0,37 ; IC_{95\%} = [0,29 - 0,45]$$

Données censurées à droite à 20 000 UFC/100 ml pour les coliformes fécaux, 6 000 UFC/100 ml pour les entérocoques et à 150 NTU pour la turbidité.

Les chroniques de turbidité, du débit et du COT de l'Oise présentent une saisonnalité similaire (figure 5). Les crues hivernales sont accompagnées de pics de la turbidité et du COT marquant la dégradation de la qualité de l'eau. On observe cependant que les crues les plus intenses (2002, 2003) ne marquent pas nécessairement une plus forte dégradation de la turbidité (2005, 2006, 2007). Lors des pics, le niveau de la turbidité peut dépasser les 100 NTU (p98 à 76 NTU) contre 20 NTU en moyenne. Les pics hivernaux de débit représentent 4 à 5 fois le débit moyen. Les pics hivernaux de débit représentent 4 à 5 fois le débit moyen.

I Figure 5 I

Séries temporelles du débit, turbidité et COT des eaux de l'Oise à Méry-sur-Oise, 2002-2007



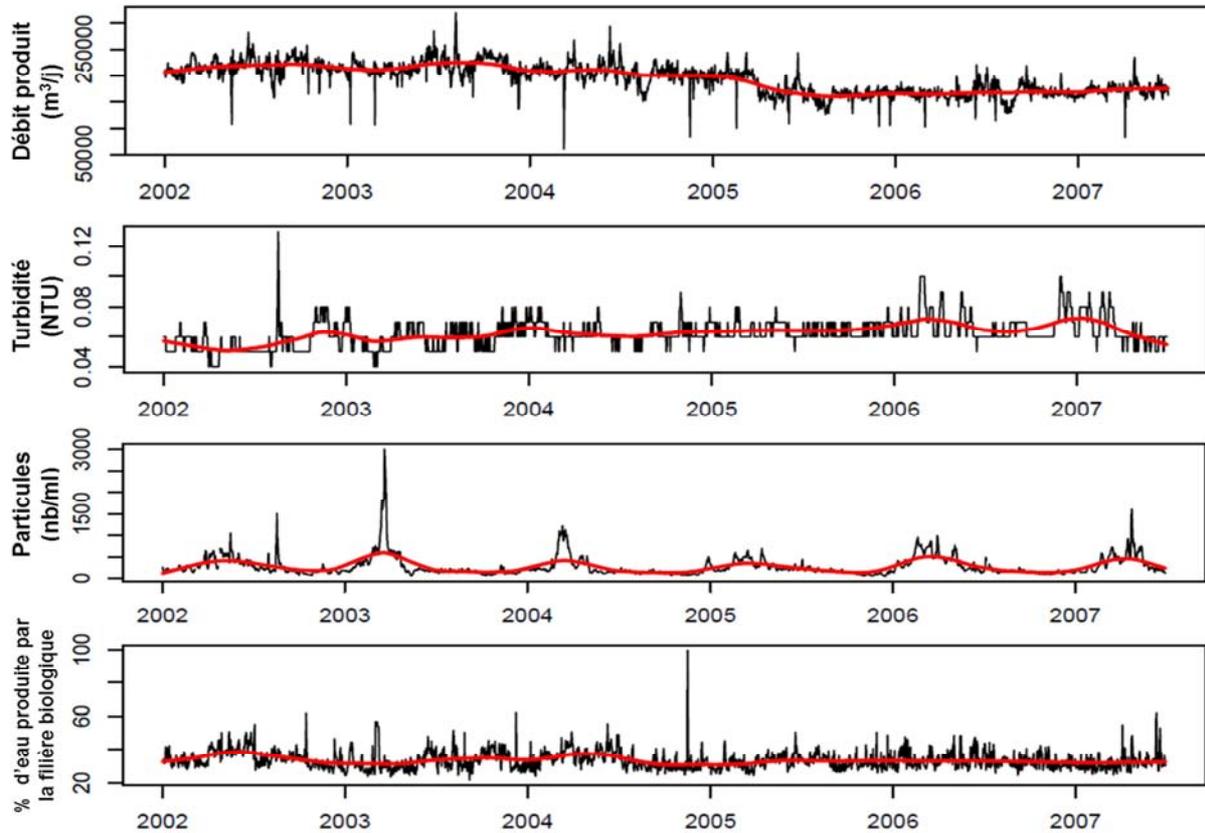
4.2.4. Eaux traitées

À la sortie des filtres à sable de l'usine de Méry-sur-Oise, l'eau présente une turbidité moyenne de 0,06 NTU et un maximum de 0,13 NTU, observé le 18 août 2002 (figure 6). La tendance de la turbidité moyenne est stable sur la période 2002-2007. La turbidité moyenne de l'eau mise en distribution est de 0,03 NTU et ne présente aucune variation sur la période d'étude (chronique non montrée).

La production moyenne de l'usine est d'environ 194 000 m³/j. La tendance montre une légère baisse de la production à partir de mi-2003 qui se stabilise en 2005. Le maximum de production est observé le 6 août 2003 avec un niveau de plus de 320 000 m³/j. L'usine a fonctionné constamment durant la période d'étude.

I Figure 6 I

Séries temporelles du débit produit, de la turbidité et du nombre de particules de l'eau filtrée, de la proportion d'eau issue de la filière biologique à l'usine de Méry-sur-Oise, 2002-2007



La chronique des concentrations en particules de l'eau filtrée montre des maximums durant les périodes hivernales. Ces pics représentent environ entre 3 et 4 fois le niveau moyen de 280 particules par ml. Le pic maximum et exceptionnel de 3 000 particules par ml a été observé le 21 mars 2003.

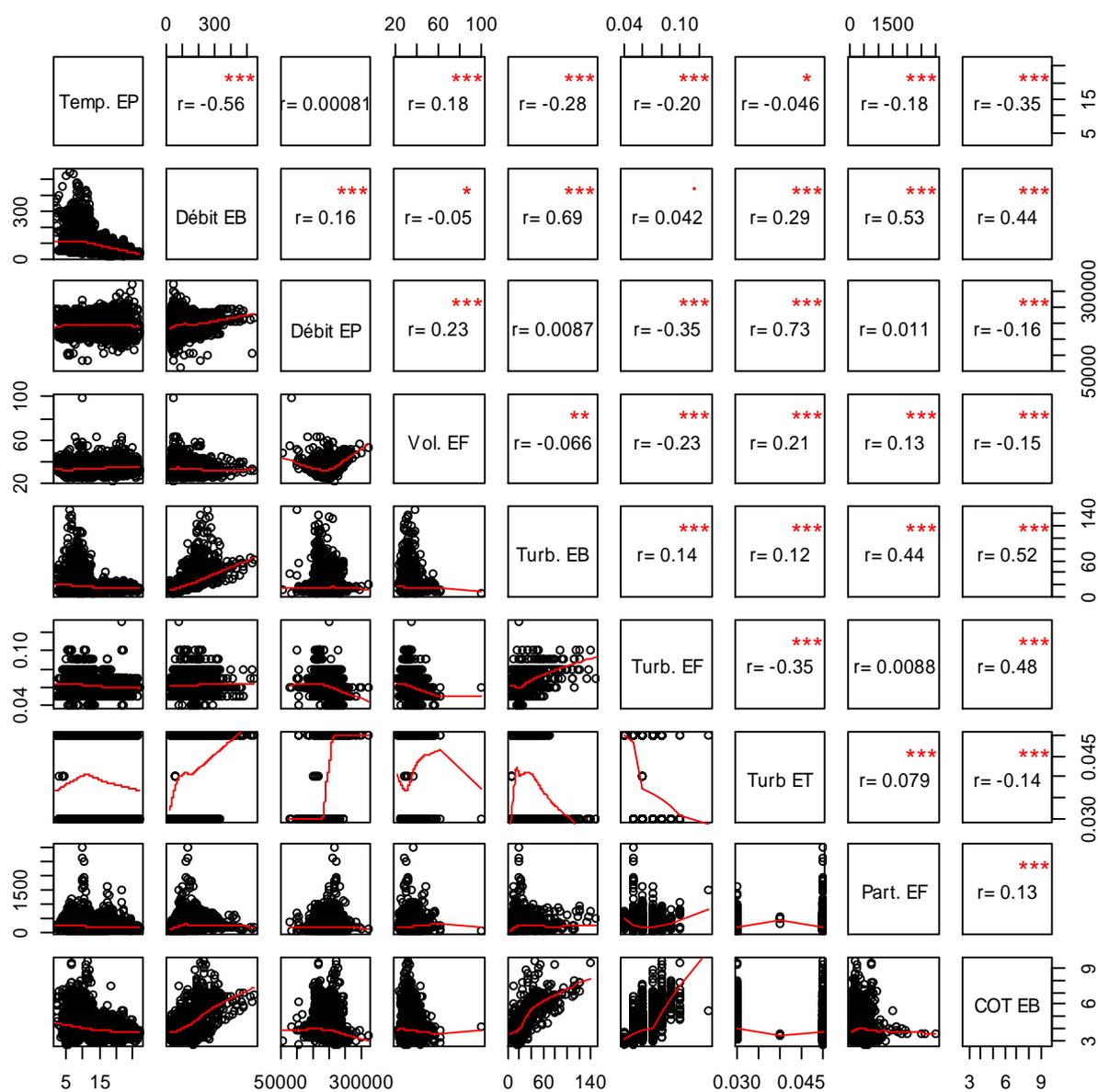
Le volume d'eau produit par la filière biologique représente environ un tiers du volume total produit. Cette proportion est stable sur l'ensemble de la période d'étude. La filière biologique a dû suppléer totalement la filière membranaire durant une journée le 16 novembre 2004.

4.3. Corrélation entre covariables

Les corrélations entre les covariables disponibles pour le secteur du Sedif-nord ont été testées par la méthode de Spearman (figure 7). La turbidité de l'eau filtrée n'apparaît pas corrélée au nombre de particules mesurées dans l'eau filtrée ($r=8,8.10^{-2}$, $p>0,1$). Le nombre de particules est positivement corrélé à la turbidité de l'eau brute ($r=0,44$, $p<0,001$) ou au débit de l'Oise ($r=0,53$, $p<0,001$).

Figure 7 I

Matrice des corrélations entre les covariables utilisables pour le secteur Sedif-nord



Le « r » est calculé selon la méthode de Spearman : * = $p < 0,1$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$.
EB = eau brute ; EF = eau filtrée ; EP = eau traitée.

4.4. Relation entre la turbidité et l'incidence des GEAm

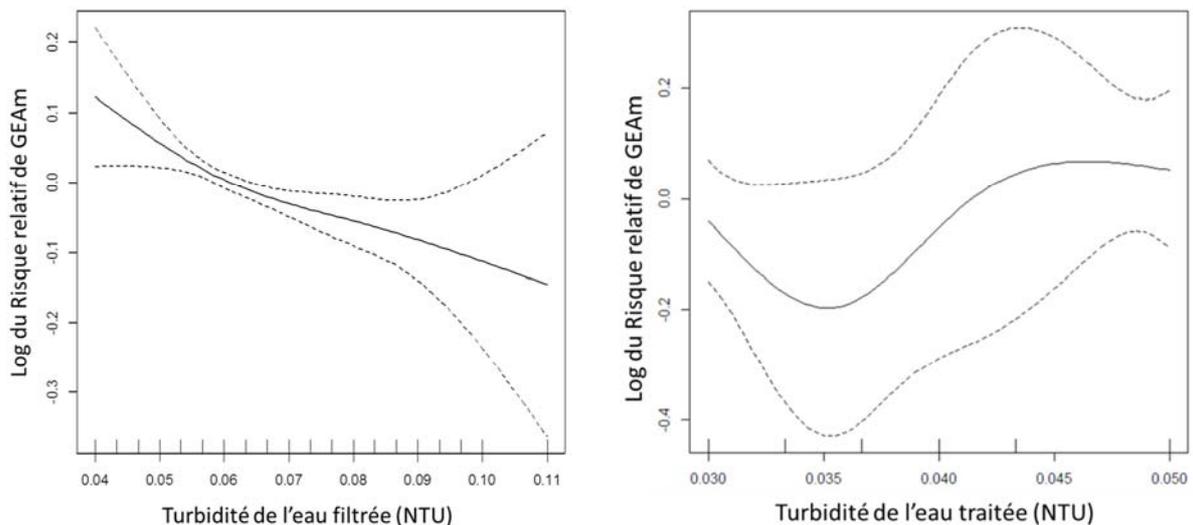
Les premières analyses réalisées ont consisté à tester la relation entre le niveau de turbidité de l'eau traitée (moyenne des *lags* 6 à 8) ou la turbidité de l'eau filtrée (moyenne des *lags* 6 à 8) sur le nombre de cas incidents de GEAm observés chez les 1-15 ans.

La modélisation de l'incidence des GEAm réalisée avec pour seule variable d'exposition la turbidité de l'eau traitée n'est pas significative ($p=0,5$). La forme de la relation est indéterminable (figure 8).

La forme de la relation entre la turbidité de l'eau filtrée et l'incidence des GEAm est de forme décroissante (figure 8). L'association est significative ($p=0,005$). L'exclusion des valeurs extrêmes de turbidité ($>p98$) ne modifie ni la forme de la relation, ni la significativité de l'association ($p=0,02$).

I Figure 8 I

Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans du secteur Sedif-nord en fonction de la turbidité de l'eau filtrée (gauche) et de l'eau traitée (droite) à Méry-sur-Oise, avec une latence moyenne de l'effet de 6-8 jours, 2002-2007



4.5. Recherche d'autres facteurs de risque

Dans une seconde étape de l'analyse, chacune des covariables d'exposition a été testée comme variable explicative dans le modèle, sur différents décalages temporels (du lag 5 au lag 15). Le degré de significativité statistique de l'association et l'adéquation par rapport à la forme attendue de la relation, au regard des résultats déjà acquis, ont été appréciés pour chaque test entre une covariable mesurée au jour j et le nombre quotidien de cas de GEAm survenus entre $j+5$ et $j+15$ (tableau 4).

I Tableau 4 I

Résultats de l'analyse statistique des associations entre l'incidence des GEAm chez les 1-15 ans et les variables d'exposition utilisées sur le secteur Sedif-nord, pour différentes latences de l'effet, 2002-2007

Variables	jeu de données	Latences											Tendance attendue		
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
Eau brute	Débit Oise	$p100$	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1		↗	
		$< p98$	3	3	2	1									
	Turbidité	$p100$	3	3	2	1									↗
		$< p98$													
COT	$p100$	2	2	1			1						↗		
	$< p98$	2	2	1		1	2		2	2					
Eau filtrée	Turbidité	$p100$	2	2	1								↗		
		$< p98$	1	1				1							
	Particules	$p100$	2	2	3	5	4	4	4	2	2	1	1	↗	
		$< p98$	3	2	3	5	3	3	3	2	2				
Eau traitée	Température eau	$p100$		1	1	2	3	3	4	4	4	3	3	U	
		$< p98$		1	1	2	3	3	4	4	3	3	3		
	Débit produit	$p100$	4		2	7	3	3	2		1	1		↗	
		$< p98$	4	1	2	7	2	2	2	1	1	1			
Volume filière biologique	$p100$				2							1	↗		
	$< p98$				1				1	1					

Forme de la relation conforme à la tendance attendue.

Forme de la relation partiellement conforme à la tendance attendue.

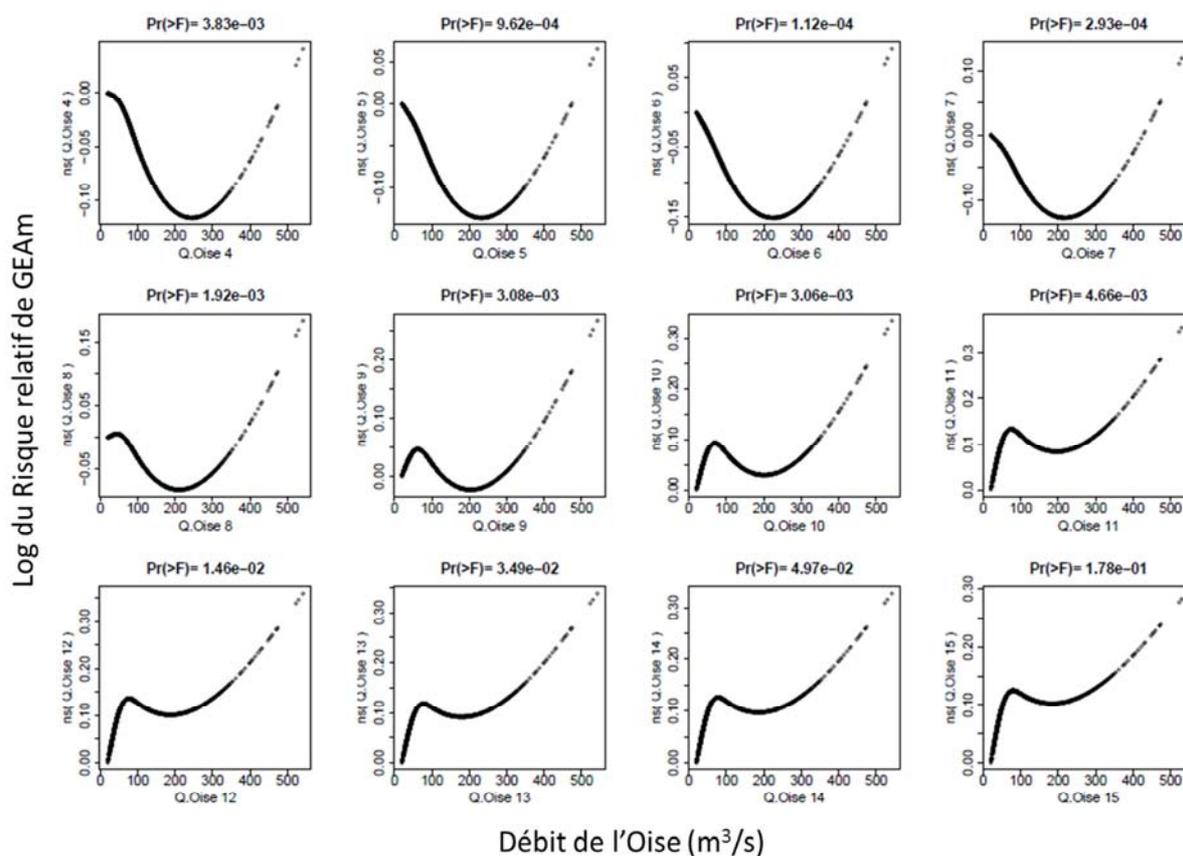
Le chiffre indique le degré de significativité (1 = $p < 0,1$; 2 = $p < 0,01$; 3 = $p < 0,001$; 4 = $p < 0,0001$; etc.)

4.5.1. Débit de l'Oise

La forme de la relation entre le débit de l'Oise et l'incidence des GEAm est stable sur les *lags* compris entre 4 et 8 (figure 9). Elle est en forme de « U » avec un minimum compris entre 200 et 300 m³/s. À partir du *lag* 9, la relation présente une forme indéterminable. Toutes les associations sont significatives, exceptée celle au *lag* 15. La suppression des valeurs de débit supérieures au percentile 98 tend à rendre la relation totalement décroissante.

Figure 9 |

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 du secteur Sedif-nord en fonction du débit de la ressource (Oise), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

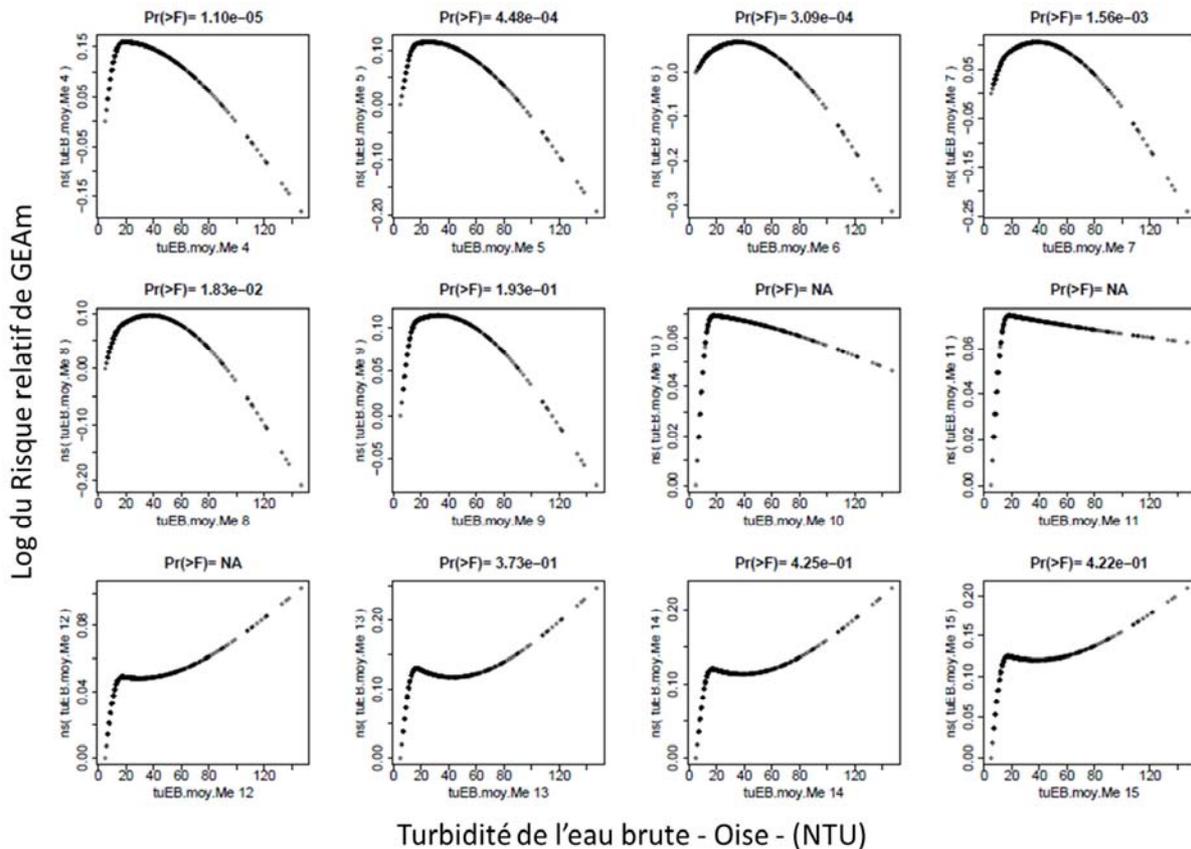


4.5.2. Turbidité de l'eau brute

Entre les *lags* 4 et 11, la forme de la relation entre la turbidité de l'Oise et l'incidence des GEAm présente un maximum situé entre 20 et 40 NTU. La forme de cette relation est stable sur les *lags* compris entre 4 et 11 (figure 10). Les associations sont significatives ($p < 0,05$) jusqu'au *lag* 8. La suppression des valeurs supérieures au percentile 98 inverse la partie décroissante sur la plupart des *lags*.

Figure 10 |

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-nord en fonction de la turbidité de l'eau de la ressource (Oise), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

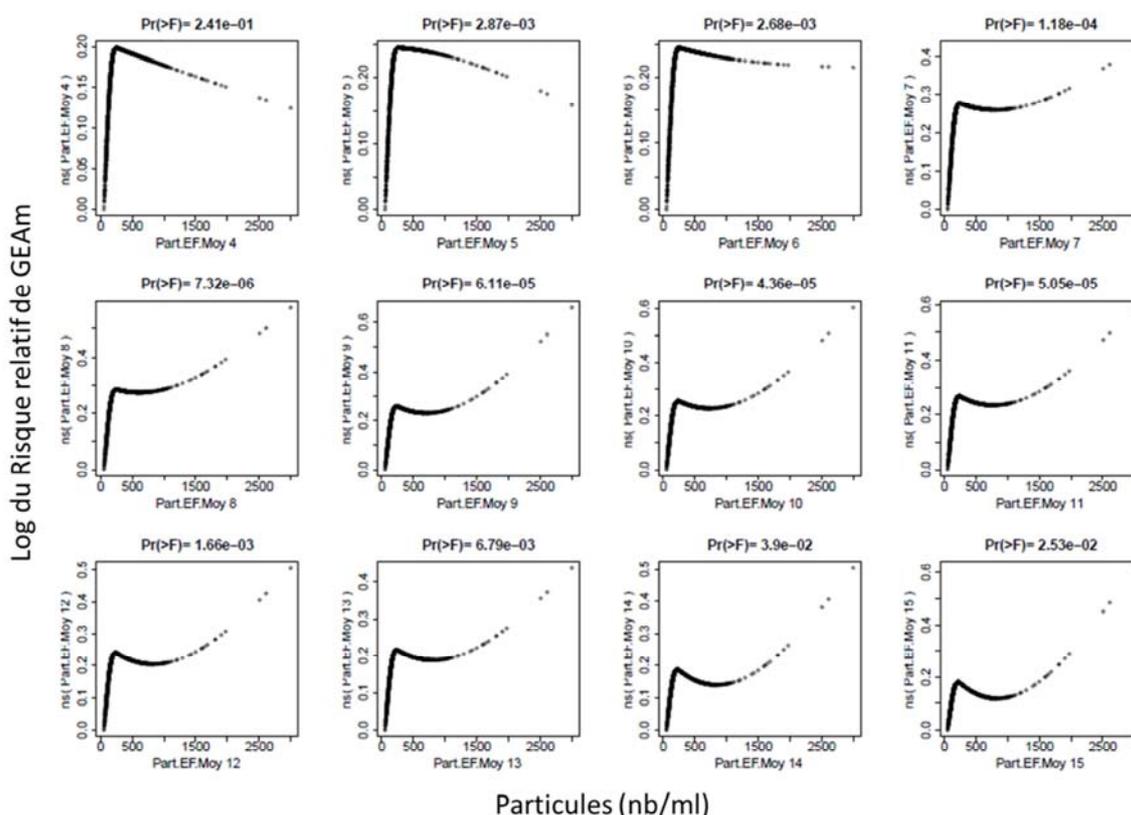


4.5.3. Nombre de particules de l'eau filtrée

Entre les *lags* 5 et 15, la forme de la relation entre le nombre de particules dans l'eau filtrée et l'incidence des GEAm est stable et présente une tendance fortement croissante entre le minimum (53) et la médiane (198). Au-delà de la médiane, la forme de la relation est plane (figure 11). Les associations sont toutes significatives ($p < 0,05$) à partir du *lag* 5. La suppression des valeurs extrêmes ne modifie pas la forme des relations mais supprime la significativité des associations aux *lags* les plus tardifs (14 et 15).

Figure 11 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-nord en fonction du nombre de particules de l'eau filtrée à Méry-sur-Oise, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007



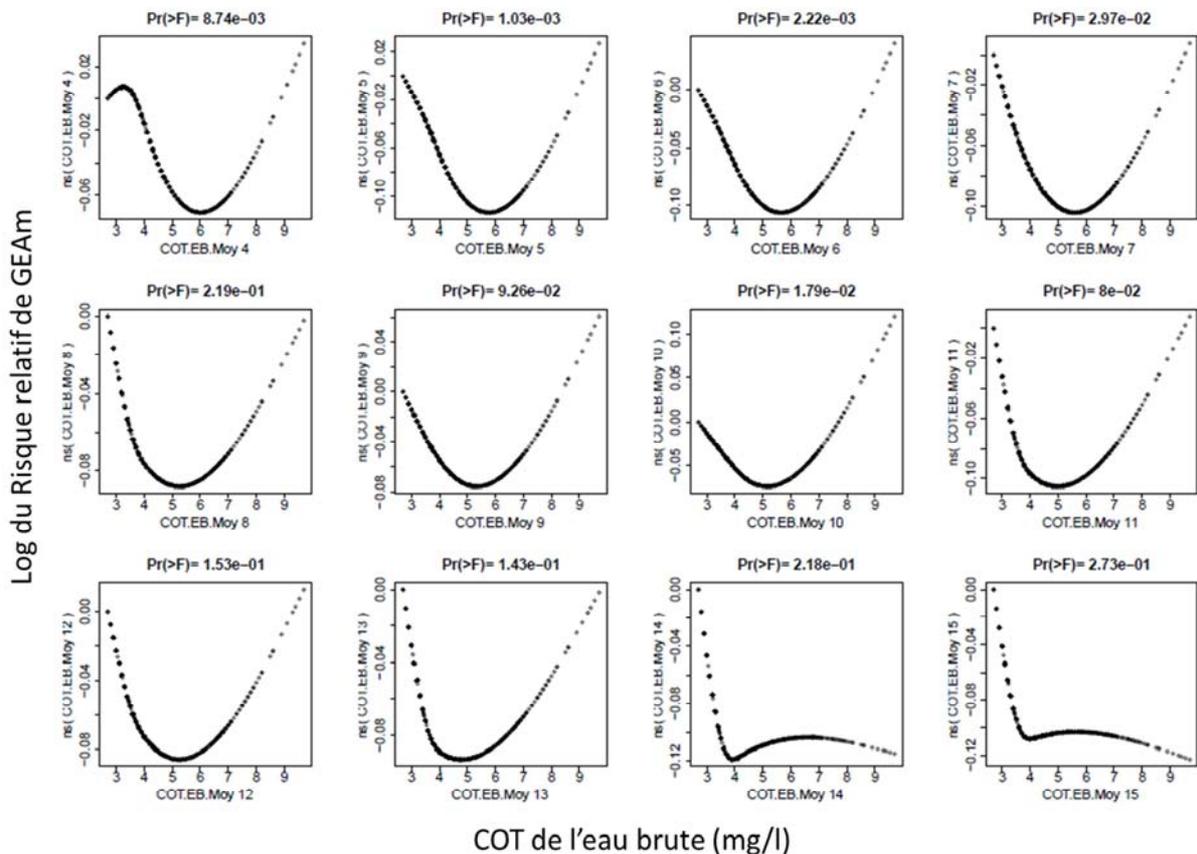
Les résultats mettent en évidence un risque croissant de GEAm pour une variation interquartile du nombre de particules (résultats non montrés) si la variable « nombre de particules de l'eau filtrée » est introduite sous la forme d'une moyenne des *lags* 6 à 8. L'association est significative ($p = 1.10^{-3}$).

4.5.4. Carbone organique de l'eau brute

La forme de la relation entre la concentration en carbone organique totale de l'eau de l'Oise et l'incidence des cas de GEAm présente une forme en « U » stable entre les lags 4 et 13 avec un minimum compris entre 5 et 6 mg/l (figure 12). Les associations aux lags 4, 5, 6, 7 et 10 sont significatives. La suppression des valeurs extrêmes (>p98) stabilise la forme de la relation sur l'ensemble des lags (jusqu'à 15) et rend significative les associations aux lags 9, 12 et 13.

Figure 12 |

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-nord en fonction du carbone organique total de l'eau de la ressource (Oise), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

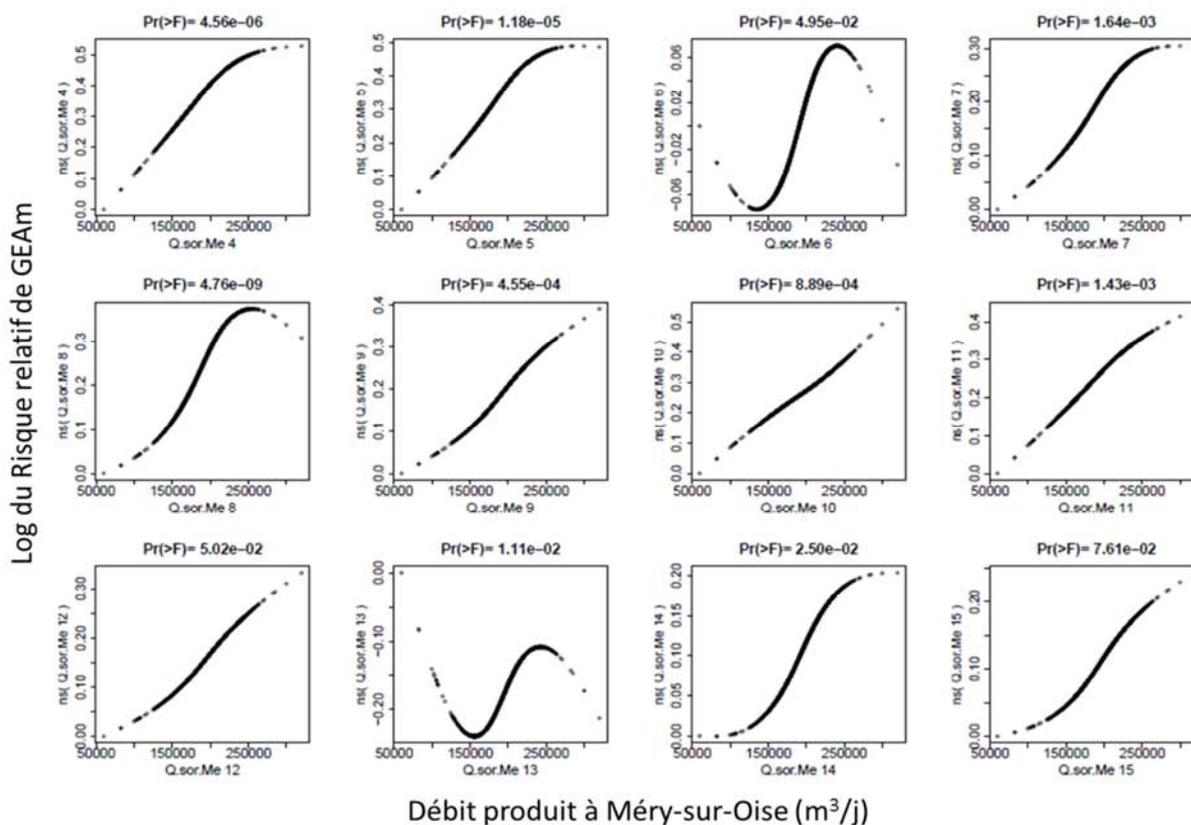


4.5.5. Débit produit

La forme de la relation entre le débit produit par l'usine de Méry-sur-Oise et l'incidence des GEAm est croissante sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 13) et quasi linéaire sur son domaine de variation. La plupart des associations sont significatives, exceptées au *lags* 6, 12 et 15. Au *lag* 8, l'association est même très significative ($p < 1.10^{-8}$). La suppression des valeurs extrêmes ($> p98$) ne modifie ni les formes des relations ni la significativité des associations.

Figure 13 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-nord en fonction du débit produit par l'usine de Méry-sur-Oise, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

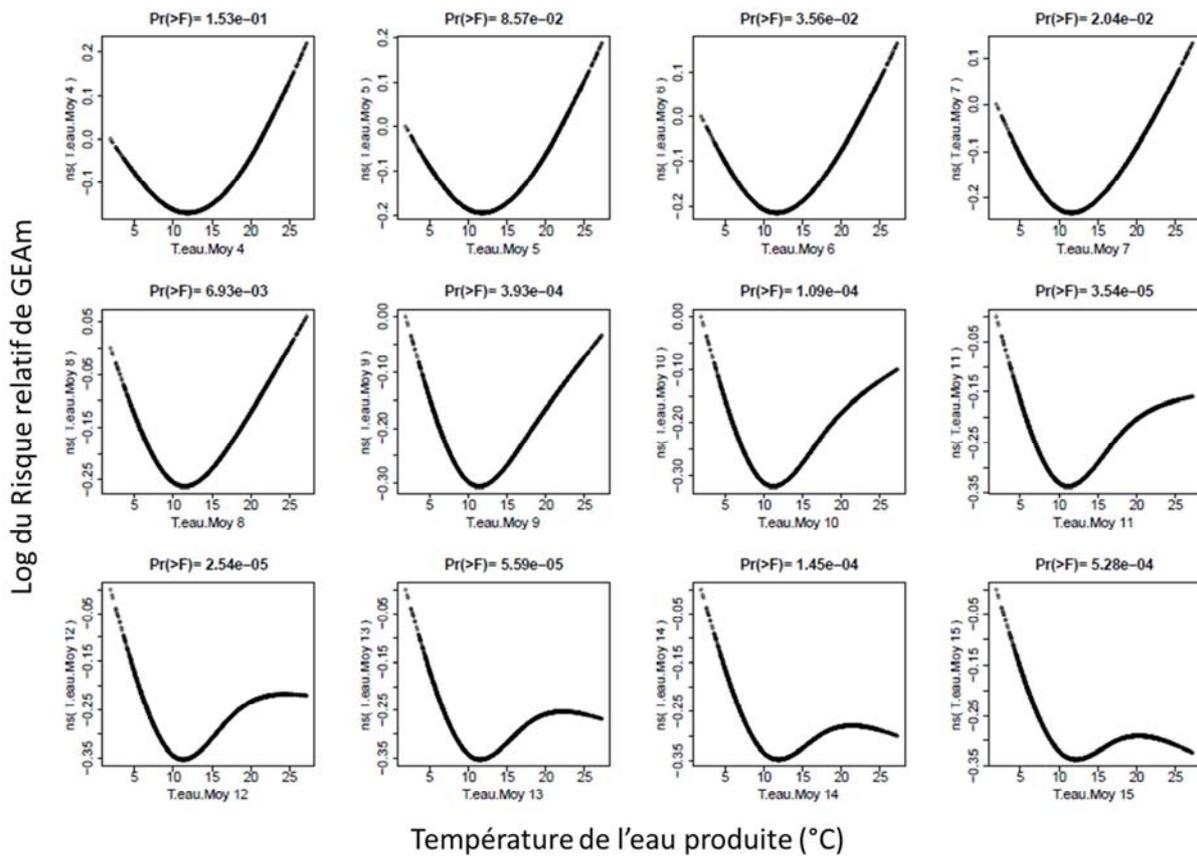


4.5.6. Température de l'eau traitée

Sur l'ensemble des *lags* étudiés, la forme de la relation entre la température de l'eau traitée est stable et présente une forme en « U » avec un minimum compris entre 10 et 15 °C (figure 14). Les associations sont significatives entre les *lags* 5 et 15. La suppression des valeurs extrêmes n'a aucune influence ni sur la forme des relations, ni sur la significativité des associations

I Figure 14 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-nord en fonction de la température de l'eau traitée par l'usine de Méry-sur-Oise, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007



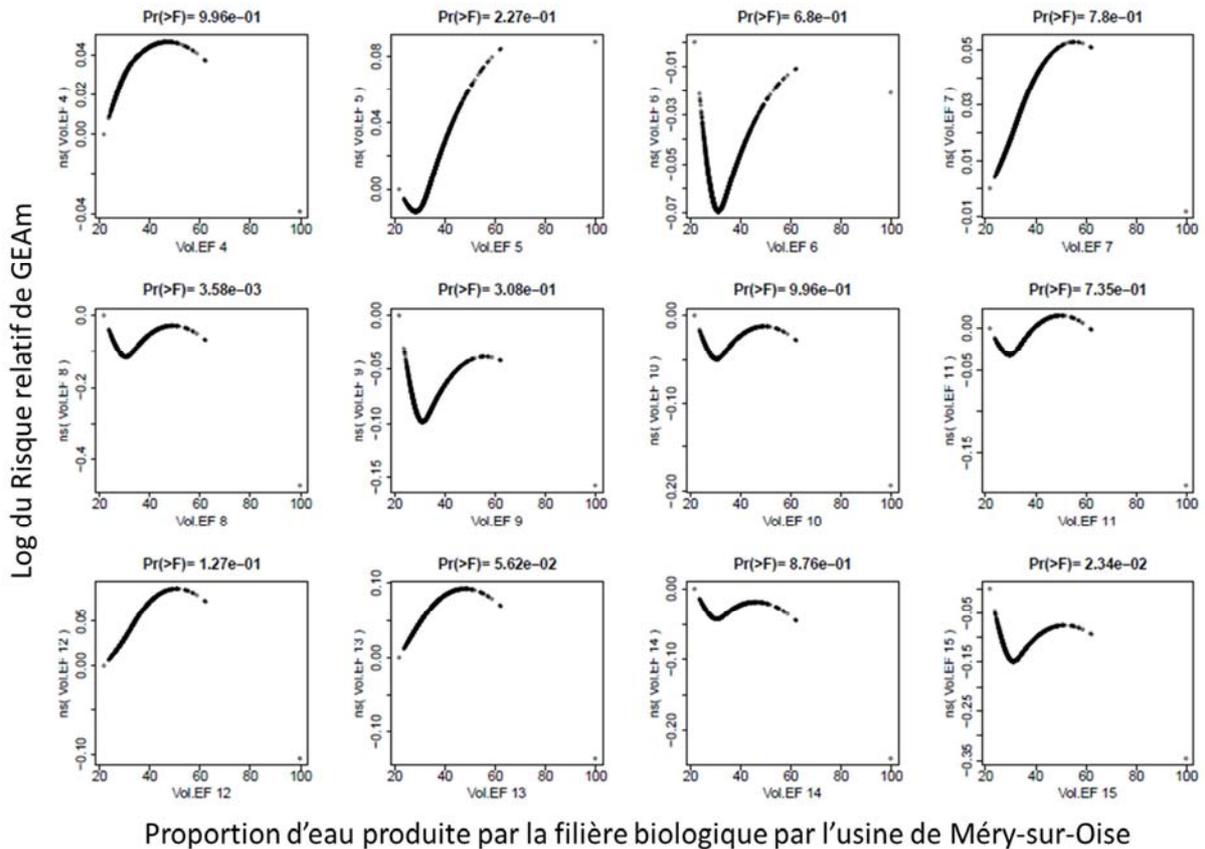
4.5.7. Proportion du débit issu de la filière biologique

La forme de la relation entre le volume d'eau produit par la filière biologique et l'incidence des GEAm apparaît instable sur les *lags* étudiés (figure 15). Elle oscille tantôt entre une forme en « U » et une forme croissante. Entre 30 et 50 % de volume produit, on observe cependant une tendance croissante stable sur l'ensemble des *lags*. Seules les associations aux *lags* 8 et 15 sont significatives. Sur ces *lags*, la relation est en forme de « U ».

La suppression des valeurs extrêmes ne stabilise pas la forme des relations sur l'ensemble des *lags* et n'améliore la significativité que sur les *lags* tardifs (12 et 13).

I Figure 15 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-nord en fonction de la proportion d'eau traitée par la filière biologique de l'usine de Méry-sur-Oise, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007



4.6. Modélisation multi-exposition

4.6.1. Construction du modèle

Les variables d'exposition incluses dans le modèle final ont été choisies sur la base des résultats obtenus lors des analyses d'autres facteurs de risques des GEAm. Au vu de ces résultats, les variables turbidité de l'eau brute, turbidité de l'eau filtrée et pourcentage de volume d'eau filtrée ne présentent pas les qualités requises pour être incluses dans la modélisation (tableau 5).

I Tableau 5 I

Synthèse de l'analyse des facteurs de risque (recherche exploratoire) sur le secteur Sedif-nord et décision d'inclusion dans le modèle multi-exposition final

Variables		Cohérence multi-lags	Significativité	Robustesse	Adéquation aux attentes	Possibilité d'inclusion dans le modèle final
Eau brute	Débit Oise	Oui	Oui	Partielle	Oui	Oui
	Turbidité	Oui	Oui	Non	Non	Non
	COT	Oui	Partielle	Oui	-	Oui
Eau filtrée	Turbidité	Oui	Oui	Oui	Non	Non
	Particules	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Eau traitée	Température	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Débit	Oui	Partielle	Oui	Oui	Oui
	Proportion de débit de la filière biologique	Partielle	Non	Non	-	Non

Le modèle retenu contient donc le débit de l'Oise, le COT de l'eau brute, le nombre de particules de l'eau filtrée, la température de l'eau et le débit produit par l'usine de Méry-sur-Oise. Au vu de la localisation des points de mesure de ces variables sur le parcours de l'eau, elles ont été introduites dans le modèle sous la forme d'une moyenne des lags 6 à 8.

Les tests de différentes combinaisons d'interactions entre covariables (résultats non montrés) ont permis de retenir le modèle le plus convaincant qui est celui comprenant une interaction entre le COT de l'eau brute et la température de l'eau traitée, avec la variable débit produit introduite sous une forme linéaire.

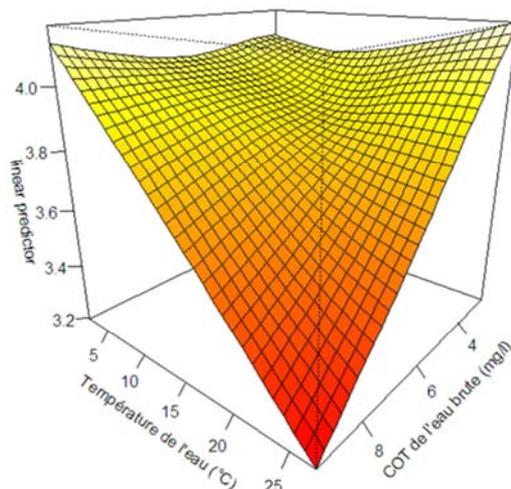
4.6.2. Modélisation chez les enfants

L'interaction entre le COT de l'eau brute et la température de l'eau traitée (figure 16) montre qu'il existe un effet de la température sur la relation entre le COT et le risque de GEAm. Le risque décroît proportionnellement à l'augmentation du COT aux fortes températures de l'eau et est inexistant aux très faibles températures. L'association est significative ($p=2,3.10^{-4}$). Le risque de GEAm lié à une augmentation interquartile du COT, de 3,5 à 4,4 mg/l, a été estimé à $0,962 IC_{95\%} = [0,929-0,996]$ pour une température de l'eau de 8,7 °C (p25) et à $0,915 IC_{95\%} = [0,877-0,954]$ pour une température de l'eau de 19,6 °C (p75). Ceci se traduit donc par un excès de risque de GEAm de 4 %

IC_{95%} = [0,4 %–7,7 %] à 8,7 °C et de 9,3 % IC_{95%} = [4,8 %–14,0 %] à 19,6 °C pour une réduction du COT de 4,4 à 3,5 mg/l.

I Figure 16 I

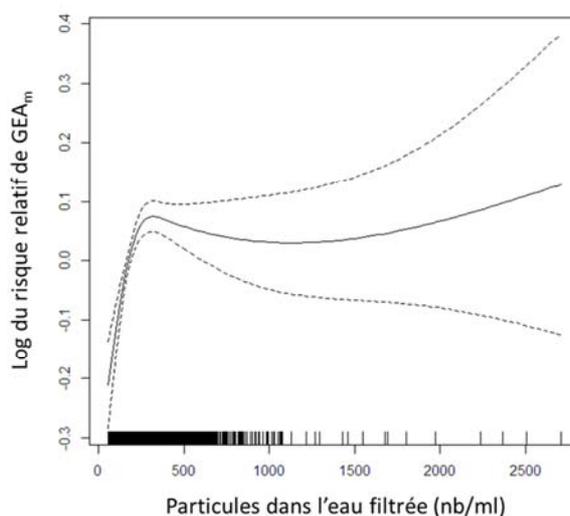
Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans du secteur SEDIF-nord en fonction du COT de l'eau brute et de la température de l'eau traitée à Méry-sur-Oise, modélisation multi-exposition (2002-2007)



Le nombre de particules dans l'eau filtrée présente une association significative ($p=8,2.10^{-8}$) avec l'incidence des GEAm (figure 17). La relation est fortement croissante entre le minimum (53 par ml) et le percentile 75 (333 par ml). Au-delà, la relation est globalement plane. La suppression des valeurs supérieures au percentile 98 ne modifie pas la forme de la relation. Le risque de GEAm lié à une augmentation interquartile des particules (de 147 à 333 particules/ml) est de 1,121 IC_{95%} = [1,075-1,170] (soit une augmentation de 12 %).

I Figure 17 I

Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans du secteur SEDIF-nord en fonction du nombre de particules dans l'eau après filtration à Méry-sur-Oise, modélisation multi-exposition (2002-2007)

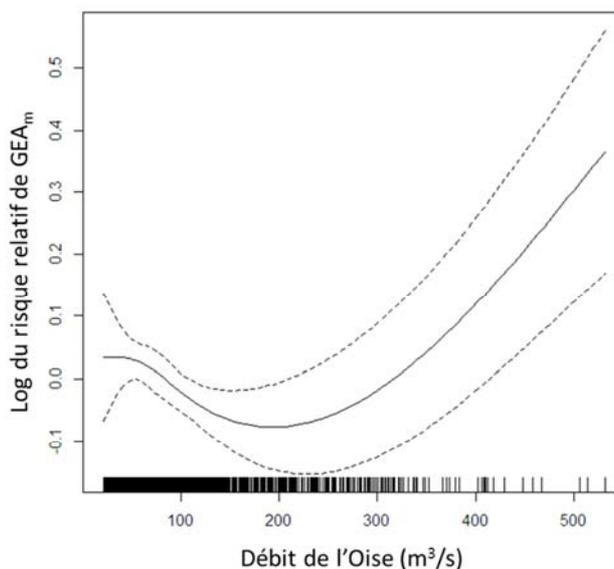


Le débit produit est associé très significativement à l'incidence des GEAm ($p=3,2.10^{-9}$). La relation est croissante. Le risque de GEAm associé à une variation interquartile du débit produit est de 1,150 $IC_{95\%} = [1,098-1,204]$.

La relation entre le débit de l'Oise et l'incidence des GEAm présente une forme en « U » très dissymétrique. La partie décroissante est comprise entre le minimum et le percentile 90 (213 m^3/s) (figure 18). L'association est significative ($p=5,8.10^{-9}$). Les valeurs extrêmes de débit ($>p98$, soit 318 m^3/s) influencent fortement la partie croissante de la relation puisque leur suppression rend la forme de la relation plane sur tout le domaine de variation du débit et l'association non significative ($p = 0,07$). Le risque de GEAm lié à une augmentation interquartile du débit de l'Oise est de 0,920 $[0,860-0,984]$. Ce qui revient à dire que la réduction du débit de l'Oise, de 122 à 46 m^3/j provoque un excès de risque de GEAm de 8,7 % $[1,6\% - 16,2\%]$.

I Figure 18 I

Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-nord en fonction du débit de l'Oise, modélisation multi-exposition (2002-2007)



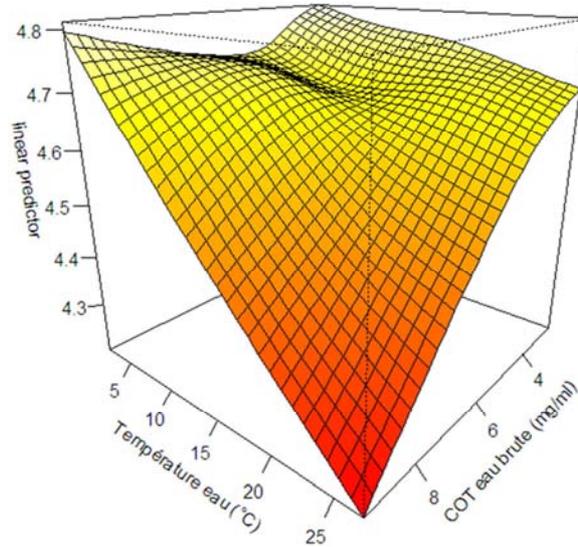
4.6.3. Test du modèle chez les adultes

Le modèle retenu pour les enfants a été reproduit sur les adultes (mêmes variables, mêmes paramètres).

La relation entre les variables COT de l'eau brute, température de l'eau traitée et l'incidence des GEAm présente une forme globalement similaire à celle observée chez les enfants, soit décroissante lorsque le COT augmente, avec un effet particulièrement marqué aux faibles valeurs de COT (figure 19). L'association est significative ($p = 0,04$). Le risque de GEAm lié à une augmentation interquartile du COT, de 3,5 à 4,4 mg/l , a été estimé à 0,948 $IC_{95\%} = [0,914-0,982]$ pour une température de l'eau de 8,7 °C (p25) et à 0,967 $IC_{95\%} = [0,928-1,007]$ pour une température de l'eau de 19,6 °C (p75). Ceci se traduit par un excès de risque de GEAm de 5,5 % $IC_{95\%} = [1,8\% - 9,4\%]$ à 8,7 °C et de 3,4 % $IC_{95\%} = [-0,7\% - 7,7\%]$ à 19,6 °C pour une réduction du COT de 4,4 à 3,5 mg/l .

I Figure 19 I

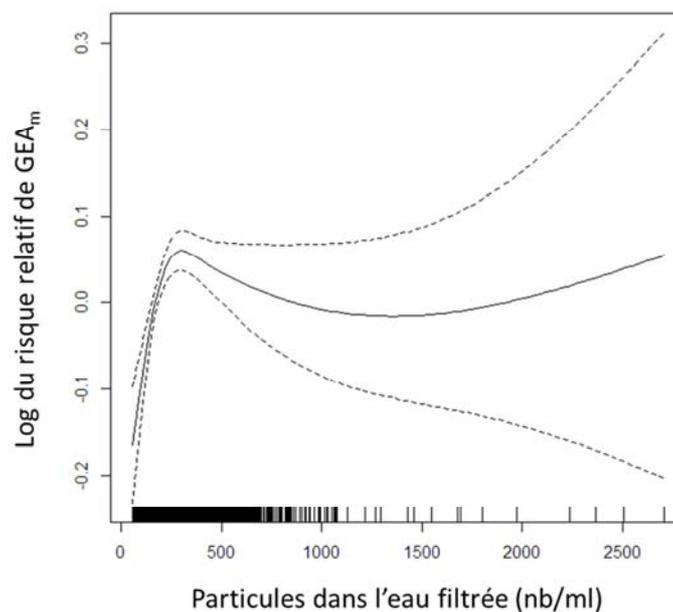
Variation du risque de GEAm chez les 16 ans et plus du secteur Sedif-nord en fonction du niveau de COT de l'eau de l'Oise et de la température de l'eau à Méry-sur-Oise, modélisation multi-exposition (2002-2007)



On retrouve également la forme de la relation observée chez les enfants entre le nombre de particules dans l'eau filtrée et l'incidence des GEAm (figure 20). L'association est très significative ($p = 6,4 \cdot 10^{-6}$). Le risque de GEAm associé à une augmentation interquartiles des particules (de 147 à 333 particules par ml) est de 1,085 IC_{95 %} = [1,043-1,129].

I Figure 20 I

Variation du risque de GEAm (log) chez les 16 ans et plus du secteur Sedif-nord en fonction du nombre de particules dans l'eau après filtration à Méry-sur-Oise, modélisation multi-exposition (2002-2007)

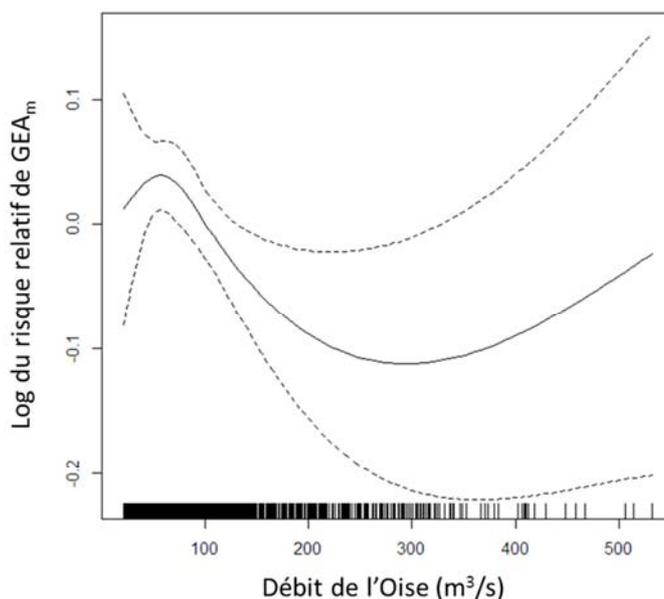


Contrairement à ce qui est observé chez les enfants, le débit produit n'est pas associé significativement à l'incidence des GEAm ($p=0,09$). La relation est croissante mais le risque de GEAm associé à une variation interquartile du débit n'est pas significatif : $1,035$ $IC_{95\%} = [0,994-1,079]$.

La relation observée entre le débit de l'Oise et l'incidence des GEAm présente une allure similaire à celle observée chez les enfants, avec une partie décroissante entre le minimum et le percentile 90 (figure 21). L'association est significative ($p=1,1.10^{-2}$). Le risque de GEAm lié à une augmentation interquartile de 46 à $122 \text{ m}^3/\text{j}$ du débit de l'Oise est de $0,941$ $IC_{95\%} = [0,884-1,002]$. Inversement, la réduction du débit de l'Oise, de 122 à $46 \text{ m}^3/\text{j}$, provoque un excès de risque de GEAm de $6,3\%$ $IC_{95\%} = [-0,2\% - 13,2\%]$.

I Figure 21 I

Variation du risque de GEAm (log) chez les 16 ans et plus du secteur Sedif-nord en fonction du débit d'eau produite par l'usine de Méry-sur-Oise (gauche) et du débit de l'Oise (droite), modélisation multi-exposition (2002-2007)



5. Résultats du secteur Sedif-est

5.1. Qualité des données

Les deux indicateurs sanitaires présentent 3,1 % de données manquantes, dont un mois complet en juin 2004 (tableau 6). L'indicateur spe115 présente 5 valeurs nulles dont une seule apparaît un dimanche. L'indicateur spe16+ présente 3 valeurs nulles dont aucune n'apparaît un dimanche. Le nombre moyen de cas de GEAm est 1,6 fois plus élevé chez les adultes que chez les enfants. Les données du recensement de la population 2006 (Insee, 2006) laissent apparaître un ratio adultes/enfants de 3,65.

I Tableau 6 I

Caractéristiques des distributions des variables utilisées sur le secteur Sedif-est

Variables	Unité	Valeurs manquantes (%)	Valeurs nulles (%)	Moyenne	Écart-type	Percentiles							
						Min	10	25	50	75	90	98	Max
cas GEAm 1-15 ans	nb/j	3,1	0,3	58,6	41,1	0	9	28	54	80	109	167	303
cas GEAm 16 ans et +		3,1	0,2	93,5	68,7	0	9	46	89	125	174	277	532
Température eau	°C	0,3	0	14,0	6,4	0,6	5,7	8,4	13,8	19,9	22,5	25,2	27,5
Débit Marne	m ³ /s	0	0	95	81	23	36	45	62	110	212	359	496
Débit produit	m ³ /j x100	0	0	343,1	49,2	158,9	285,1	318,1	343,0	367,3	401,0	458,7	537,6
Turbidité EB		1,6	0	30	35	8	11	13	17	26	66	158	316
Turbidité EF	NTU	4,7	0	0,05	0,01	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08
Turbidité ET		0,2	0	0,04	0,00	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
Particules EF	nb/ml	13,2	0	129	139	10	31	52	85	150	265	584	2 380
COT EB	mg/l	9,4	0	2,7	0,8	1,6	2,1	2,2	2,6	2,9	3,5	5,3	8
COT EF		7,8	0	1,1	0,3	0,6	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,8	2,3

EB : eau brute ; EF : eau filtrée ; ET : eau traitée

La variable température de l'eau présente 6 valeurs manquantes sur l'ensemble de la chronique, soit 0,3 % des données. Le débit de la Marne et celui produit par l'usine de Neuilly-sur-Marne sont renseignés sur l'ensemble de la période d'étude et ne présentent aucune valeur nulle.

Les chroniques de turbidité de l'eau brute, de l'eau filtrée sur sable et de l'eau traitée présentent respectivement 1,6 %, 4,7 % et 0,2 % de données manquantes. Les variables COT de l'eau brute et de l'eau filtrée présentent respectivement 9,4 % et 7,8 % de données manquantes.

5.2. Distribution des variables

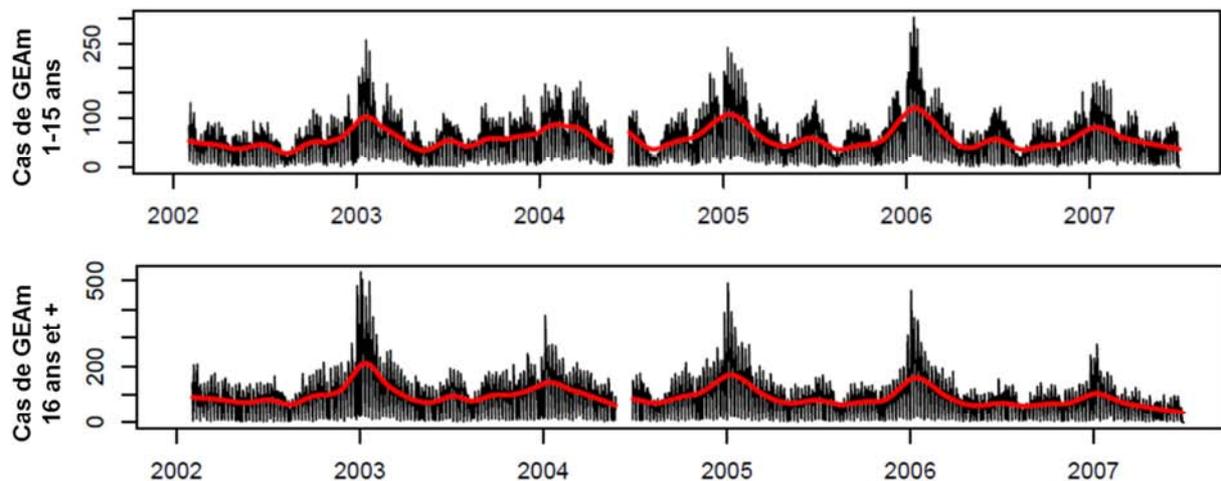
5.2.1. Incidence des GEAm

La série chronologique du nombre de cas de GEAm chez les 1-15 ans suit les pics hivernaux des épidémies de gastro-entérites (figure 22). Le maximum de 303 cas de GEAm a été observé le 16 janvier 2006 et correspond à environ 5,2 fois le nombre de cas moyen sur l'ensemble de la chronique.

Chez les adultes, le maximum de 532 cas de GEAm a été observé le 3 janvier 2003. Il correspond à 5,7 fois la valeur moyenne de ca de GEAm. Les épidémies hivernales de 2003, 2005 et 2006 ont été particulièrement marquées. Ces résultats sont comparables à ceux observés sur les autres secteurs du Sedif (paragraphes 4.2.1 et 6.2.1) ou à Paris [14;15] durant la même période.

I Figure 22 I

Nombre de cas quotidiens de GEAm résidants sur le secteur Sedif-est, 2002-2007

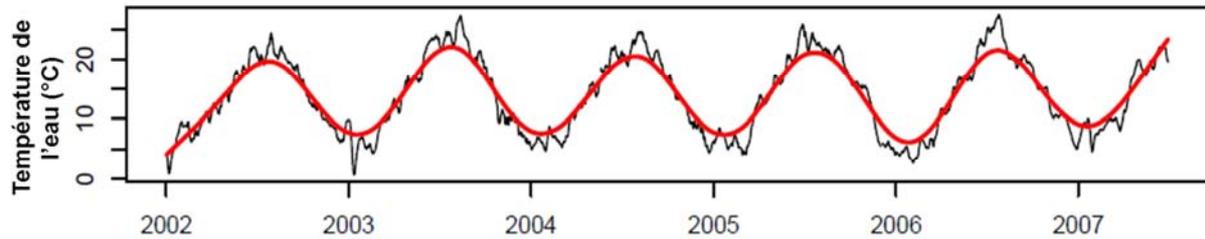


5.2.2. Température de l'eau

La chronique de température de l'eau de la Marne présente les mêmes tendances que celles de la température de l'air mesurée à Paris Montsouris (figure 23). Le maximum de température de l'eau de 27,5 °C était mesuré le 26 juillet 2006 et le minimum de 0,6 °C le 12 janvier 2003.

I Figure 23 I

Séries temporelles de la température de l'eau traitée par l'usine de Neuilly-sur-Marne, 2002-2007



5.2.3. Eaux brutes

Les données d'autocontrôle de l'usine de Neuilly-sur-Marne ont été utilisées afin d'évaluer la qualité microbiologique de l'eau de la Marne sur la période 2002-2007. Les paramètres coliformes totaux, coliformes fécaux, entérocoques et spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices ont été retenus afin d'évaluer d'une part le niveau de contamination microbiologique général et d'autre part le niveau de contamination microbiologique d'origine fécale (tableau 7).

Le niveau de contamination moyen par les coliformes fécaux est de 3 089 UFC/100 ml, soit bien supérieur à celui de l'Oise, et celui des entérocoques est quatre fois moindre (751 UFC/100 ml). La Marne à Neuilly-sur-Marne présente un niveau de contamination microbiologique général moyen avec 21 444 UFC/100 ml de coliformes totaux et un p90 à 41 724 UFC/100 ml.

I Tableau 7 I

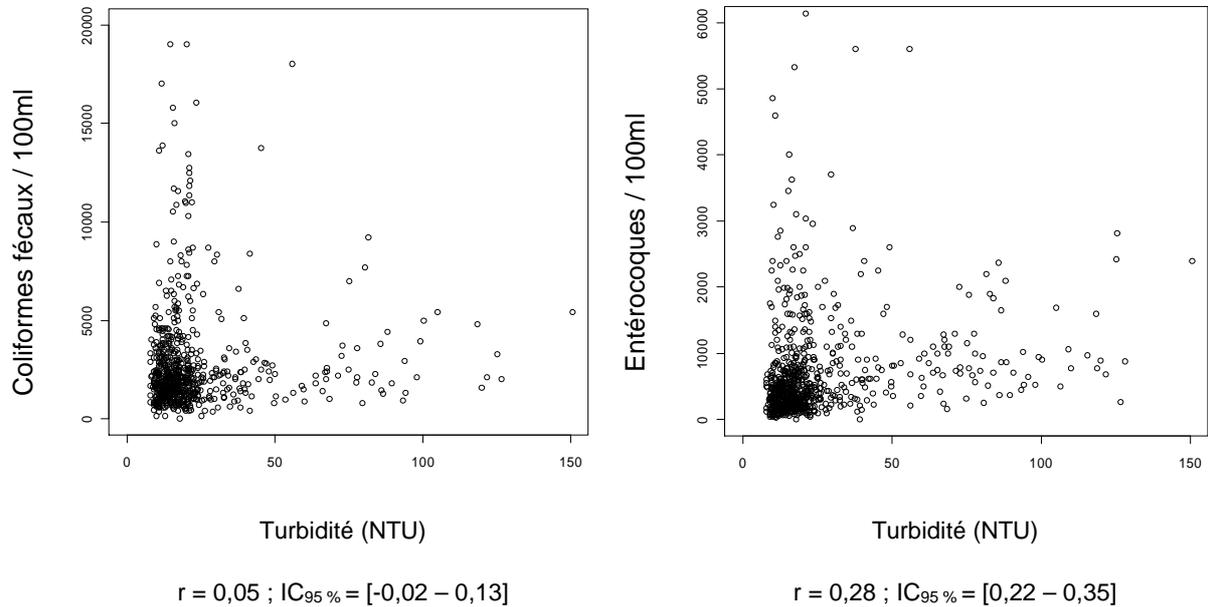
Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes de la Marne à Neuilly-sur-Marne, 2002-2007

Paramètre	Nombre d'analyses	Moyenne	Écart-type	Percentiles							
				Min	10	25	50	75	90	98	Max
Coliformes totaux/100ml	777	21 444	29 745	380	3 970	7 500	13 750	23 000	41 724	105 625	300 000
Coliformes fécaux/100ml	704	3 089	4 077	17	892	1 300	2 000	3 165	5 695	14 934	48 400
Entérocoques /100ml	776	751	944	0	144	250	468	849	1 693	3 541	8 300
Spores BASF/100ml	769	108	149	0	30	46	70	116	200	439	2 500

Les analyses de régression réalisées ne montrent pas de corrélation claire entre les niveaux de turbidité de la Marne et les niveaux de coliformes fécaux. La corrélation avec les entérocoques apparaît légère (figure 24).

I Figure 24 I

Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes de la Marne à Neuilly-sur-Marne en fonction de la turbidité, période 2002-2007.

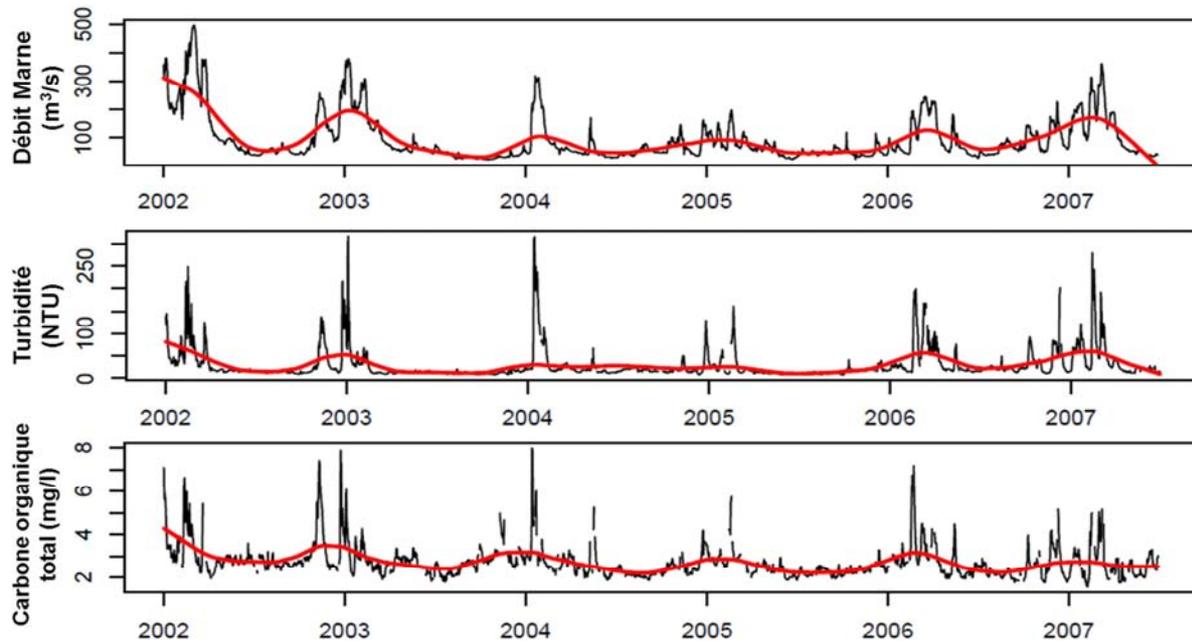


Données censurées à droite à 20 000 UFC/100 ml pour les coliformes fécaux, 6 000 UFC/100 ml pour les entérocoques et 150 NTU pour la turbidité.

Les chroniques de turbidité, de débit et de COT de la Marne présentent une saisonnalité similaire (figure 25). Les crues hivernales sont accompagnées de pics de la turbidité et du COT marquant la dégradation de la qualité de l'eau. Lors des pics hivernaux, les niveaux de turbidité dépassent régulièrement les 100 NTU (p98 à 158 NTU) contre 30 NTU en moyenne. Les pics hivernaux de débit représentent entre 3 et 4 fois le débit moyen de la Marne.

I Figure 25 I

Séries temporelles du débit, de la turbidité et COT des eaux de la Marne à Neuilly-sur-Marne, 2002-2007



5.2.4. Eaux traitées

La production moyenne de l'usine est d'environ 343 000 m³/j. La tendance montre une baisse régulière de la production entre 2002 et 2007 (figure 26). Les maximums de production sont globalement observés en été. Le maximum a été observé le 9 juin 2004 avec un niveau de plus de 537 000 m³/j. L'usine a fonctionné constamment durant la période d'étude.

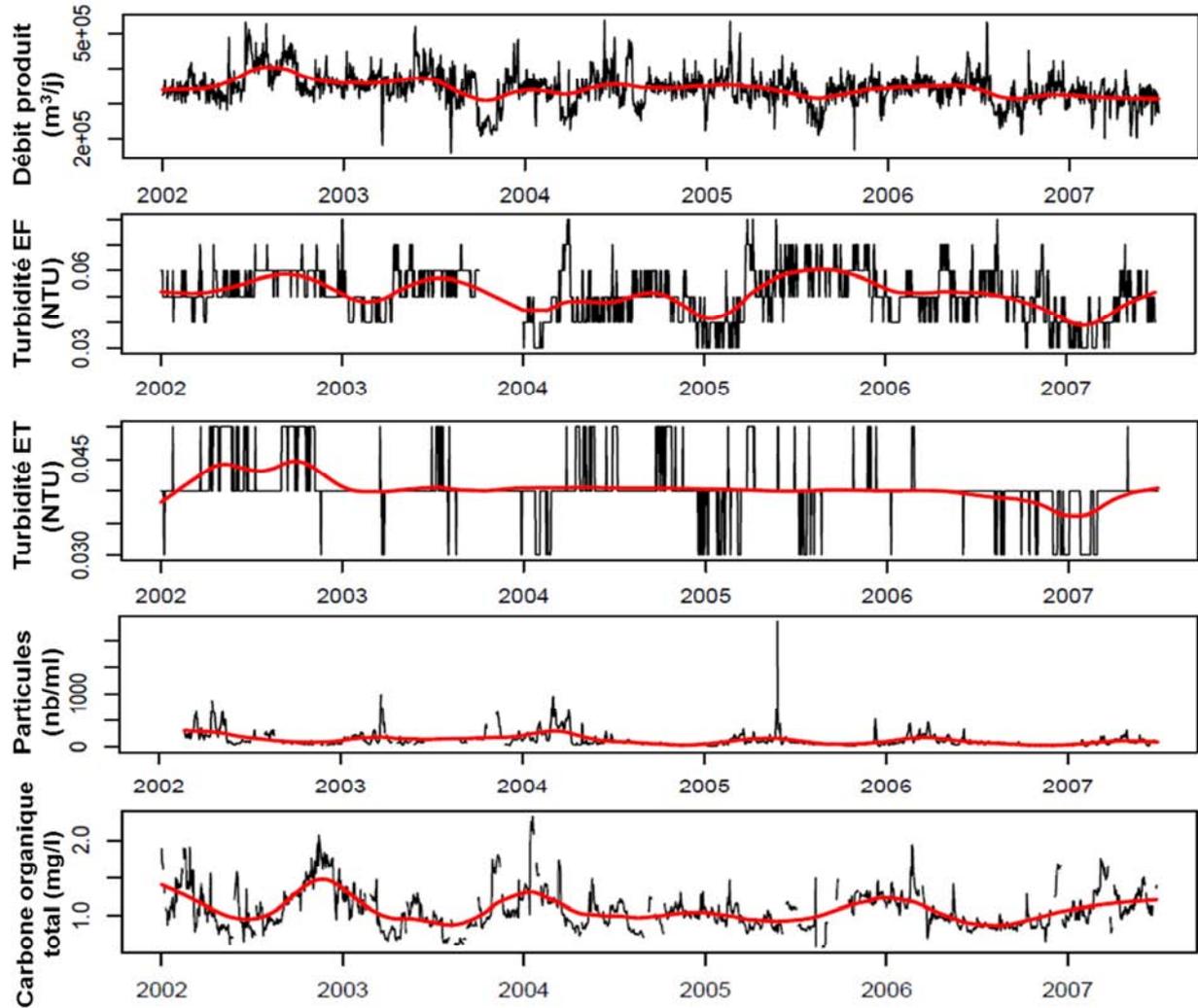
À la sortie des filtres à sable de l'usine de Neuilly-sur-Marne, l'eau présente une turbidité moyenne de 0,05 NTU et un maximum de 0,08 NTU, observé plusieurs fois sur l'ensemble de la chronique (figure 26). Quarante pour cent des valeurs se situent entre 0,04 et 0,06 NTU. La turbidité moyenne de l'eau mise en distribution est stable autour de la valeur de 0,04 NTU.

La chronique des concentrations en particules de l'eau filtrée montre des pics lors des périodes hivernales. Ces pics représentent environ entre 4 et 5 fois le niveau moyen de 129 particules par ml. Le pic maximum et exceptionnel de 2 380 particules par ml a été observé le 27 mai 2005.

La chronique des mesures du COT de l'eau filtrée présente une tendance stable autour de la moyenne de 1,1 mg/l. Le tracé suit globalement les pics hivernaux de dégradation de la qualité de la ressource. Le pic de l'hiver 2004 est particulièrement marqué (figure 26).

I Figure 26 I

Séries temporelles du débit produit, de la turbidité de l'eau filtrée (EF) et traitée (ET), du nombre de particules et du COT des eaux filtrées à l'usine de Neuilly-sur-Marne, 2002-2007

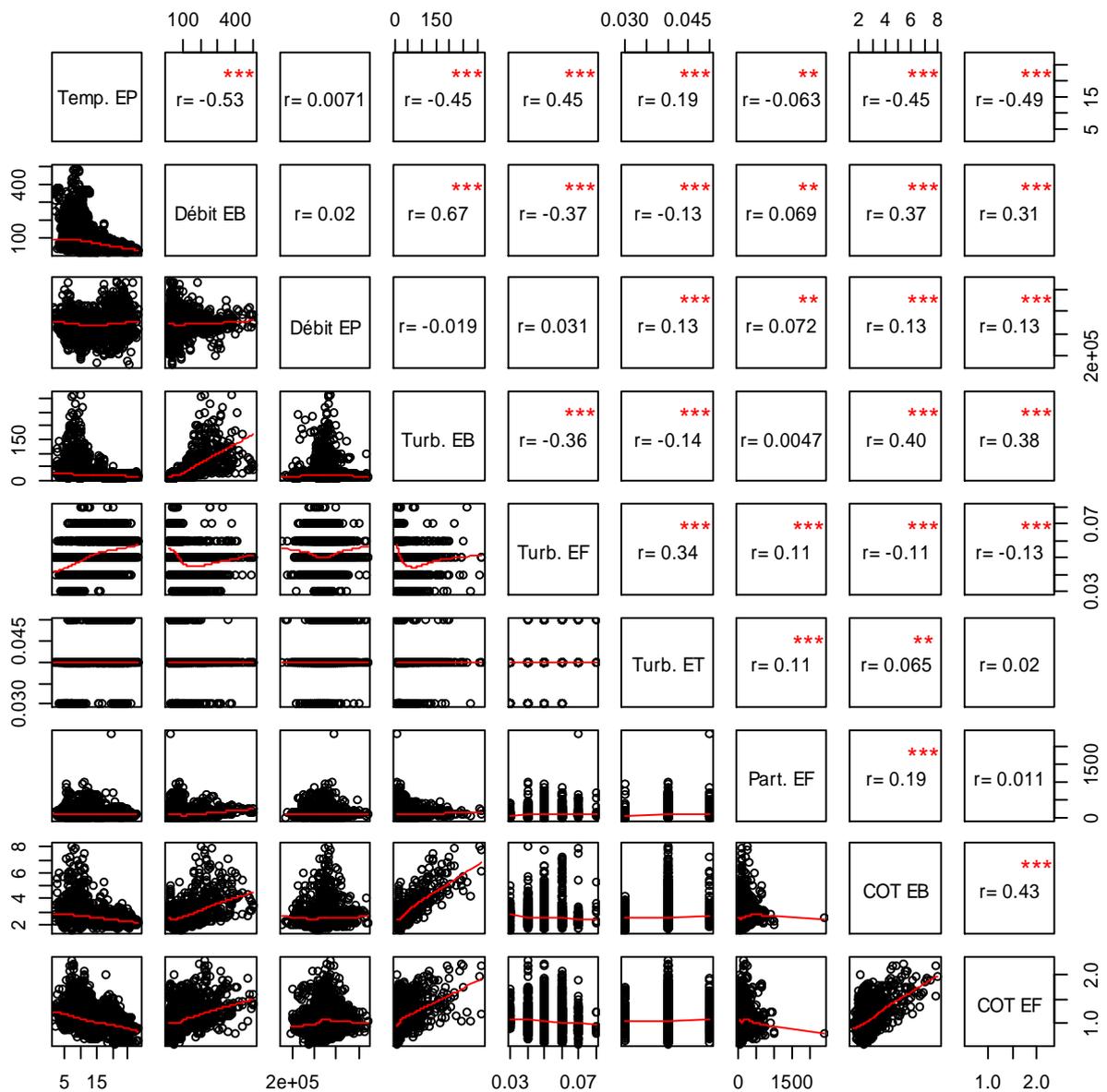


5.3. Corrélation entre covariables

Les corrélations entre les covariables disponibles pour le secteur du Sedif-est ont été testées par la méthode de Spearman (figure 27) La turbidité de l'eau brute apparaît corrélée au débit de la Marne ($r=0,67$, $p<0,001$) et au COT de l'eau brute ($r=0,40$, $p<0,001$) et COT de l'eau filtrée ($r=0,38$, $p<0,001$).

Figure 27 I

Matrice des corrélations entre les covariables utilisables pour le secteur Sedif-est



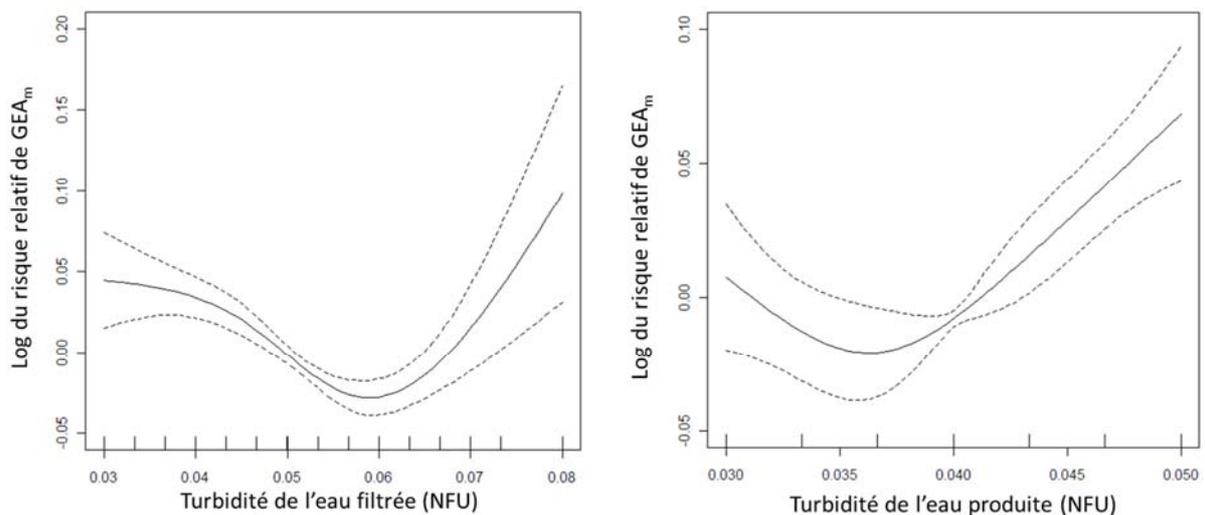
Le « r » est calculé selon la méthode de Spearman : * = $p < 0,1$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$.
EB = eau brute ; EF = eau filtrée ; EP = eau traitée.

5.4. Relation entre la turbidité et l'incidence des GEAm

Le premier test réalisé concernait la relation entre le niveau de turbidité de l'eau traitée par l'usine de Neuilly-sur-Marne (moyenne des *lags* 6 à 8) et le nombre de cas incidents de GEAm observés chez les 1-15 ans. Ce test incluait un contrôle de la température de l'eau traitée (moyenne des *lags* 6 à 8). La relation présente une partie croissante (figure 28) qui est comprise entre 0,04 et 0,05 NFU, soit entre le percentile 75 et le percentile 90. Les deux tiers des données de turbidité se concentrent sur la valeur de 0,04 NFU. L'association est significative ($p = 0,032$). L'exclusion des valeurs extrêmes de turbidité ($>p98$) modifie légèrement la forme de la relation et rend l'association non significative ($p = 0,051$).

I Figure 28 I

Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans du secteur Sedif-est en fonction de la turbidité de l'eau filtrée (gauche) ou traitée à Neuilly-sur-Marne (droite), avec une latence moyenne de l'effet de 6-8 jours, 2002-2007



La variable turbidité de l'eau traitée a ensuite été remplacée par la turbidité de l'eau filtrée. La relation avec l'incidence des GEAm présente une forme en « U » avec un minimum à 0,06 NFU, non conforme aux attentes (figure 28). L'association est significative ($p = 0,041$). La suppression des valeurs extrêmes ($>p98$) supprime la partie croissante de la relation et affecte la significativité de l'association ($p = 0,051$).

5.5. Recherche d'autres facteurs de risque

Dans une seconde étape de l'analyse, chacune des covariables d'exposition a été testée comme variable explicative dans le modèle, sur différents décalages temporels (du lag 5 au lag 15). Le degré de significativité statistique de l'association et l'adéquation par rapport à la forme attendue de la relation ont été appréciés pour chaque test (tableau 8).

I Tableau 8 I

Résultats de l'analyse statistique des associations entre l'incidence des GEAm chez les 1-15 ans et les variables d'exposition utilisées sur le secteur Sedif-est, pour différentes latences de l'effet, 2002-2007

Variables	jeu de données	Latences (jour)											Tendance attendue	
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Eau brute	Débit Marne	<i>p</i> 100	5	4	2	2	2	3	3	3	2	3	4	↗
		<i>p</i> 98	5	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Turbidité	<i>p</i> 100	5	4	4	3	3	2	1					↗
		<i>p</i> 98	5	4	4	3	3	3	2	2	1	2	3	
	COT	<i>p</i> 100	5	5	6	3	1	1						↗
		<i>p</i> 98	6	3	4	3	2							
Eau filtrée	Turbidité eau	<i>p</i> 100											↗	
		<i>p</i> 98												
	Particules	<i>p</i> 100											↗	
		<i>p</i> 98			1									
	COT	<i>p</i> 100	1	1							1	2	↗	
		<i>p</i> 98	1	1								1		
Eau traitée	Température	<i>p</i> 100	1	2	3	4	4	5	6	6	5	4	3	U
		<i>p</i> 98	1	2	3	4	5	6	7	6	5	4	3	
	Débit produit	<i>p</i> 100	4	4	5	2	2							↗
		<i>p</i> 98	4	4	5	2	2				1			
	Turbidité	<i>p</i> 100							1			1		↗
		<i>p</i> 98			1							1		

Forme de la relation conforme à la tendance attendue.

Forme de la relation partiellement conforme à la tendance attendue.

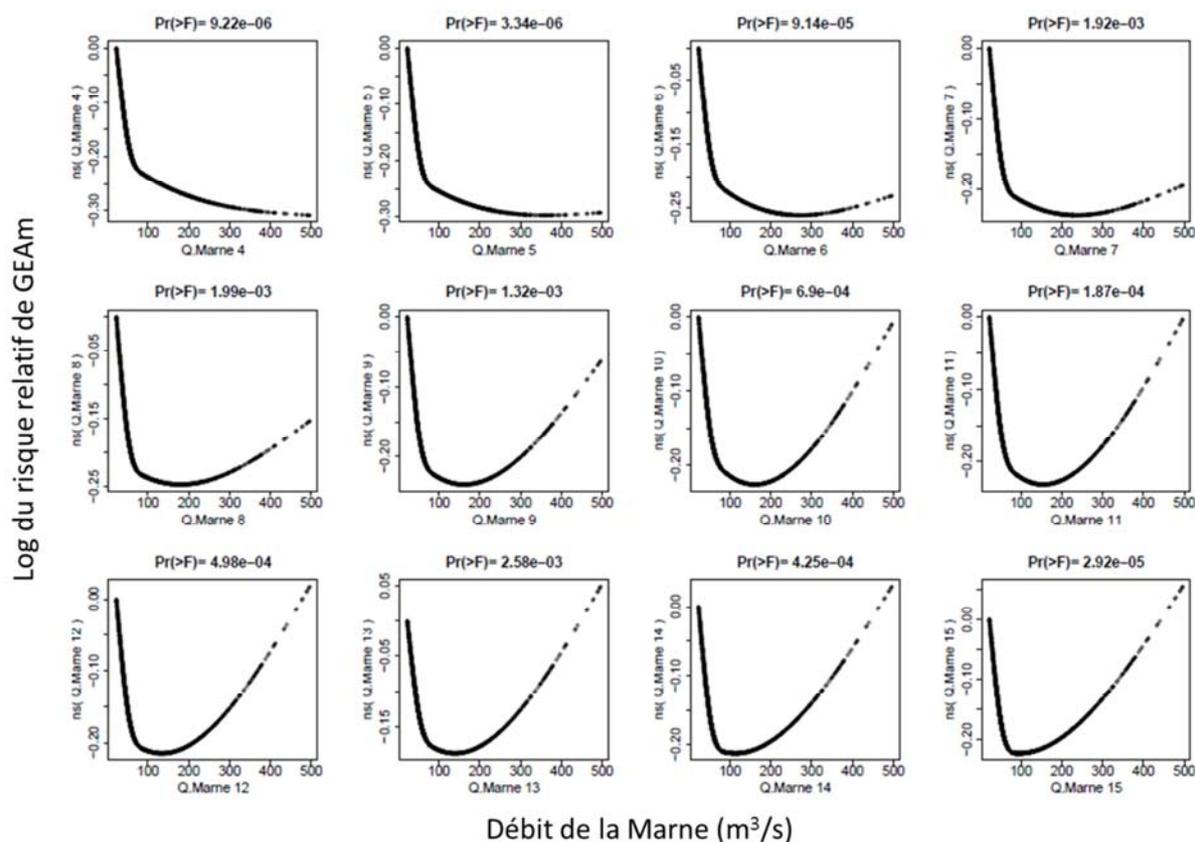
Le chiffre indique le degré de significativité (1= $p < 0,1$; 2= $p < 0,01$; 3= $p < 0,001$; etc.)

5.5.1. Débit de la Marne

La forme de la relation entre le débit de la Marne et l'incidence des GEAm est stable entre les lags 5 et 15 (figure 29). Elle est en forme de « U » avec un minimum compris entre 100 et 300 m³/s selon le lag considéré. Toutes les associations sont significatives. La suppression des valeurs de débit supérieures au percentile 98 ne modifie ni la forme des relations, ni la significativité.

Figure 29 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 du secteur Sedif-est en fonction du débit de la ressource (Marne), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

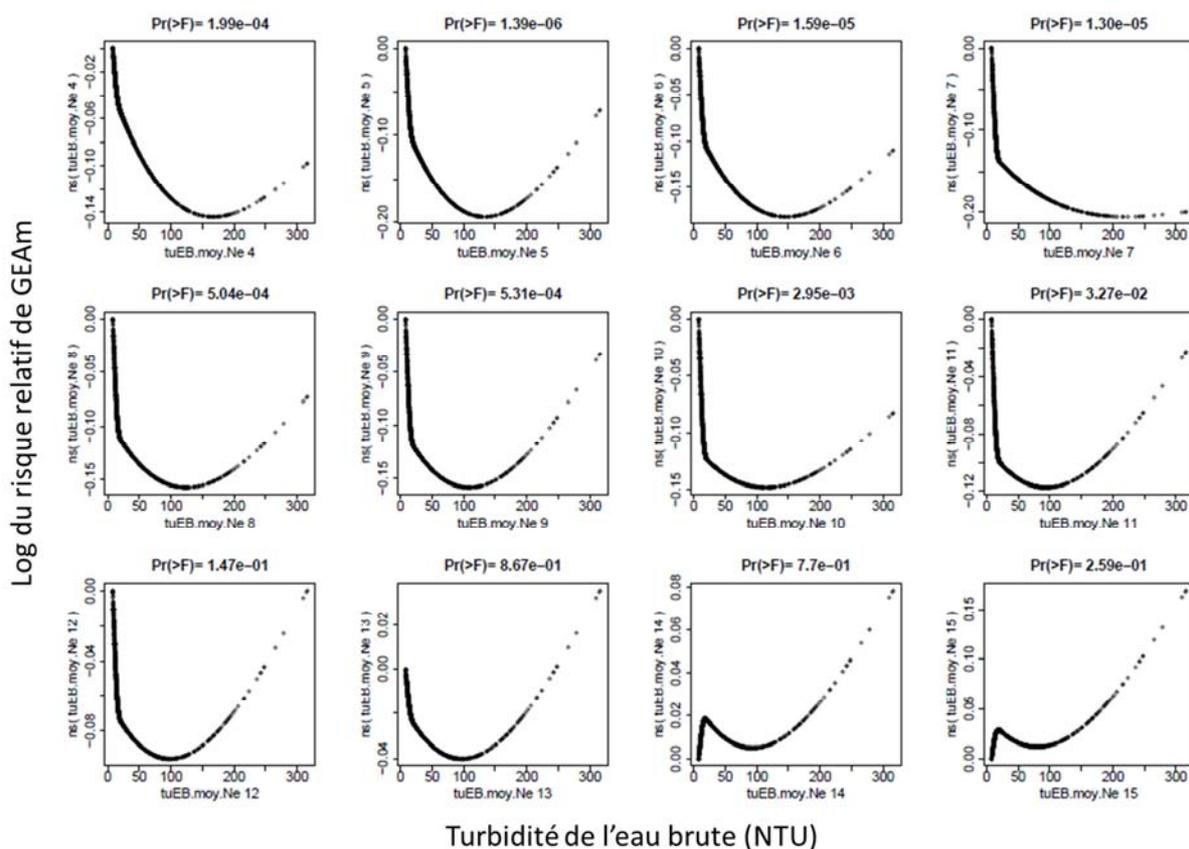


5.5.2. Turbidité de l'eau brute

La forme de la relation entre la turbidité de la Marne et l'incidence des GEAm présente une tendance principalement décroissante entre le minimum (8 NTU) et le 98^e percentile (158 NTU). La forme de cette relation est stable jusqu'au lag 13 inclus (figure 30). Les associations sont significatives ($p < 0,05$) jusqu'au lag 11. La suppression des valeurs extrêmes ($>p98$) ne modifie pas la forme des relations et améliore la significativité des associations.

Figure 30

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-est en fonction de la turbidité de l'eau de la ressource (Marne), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

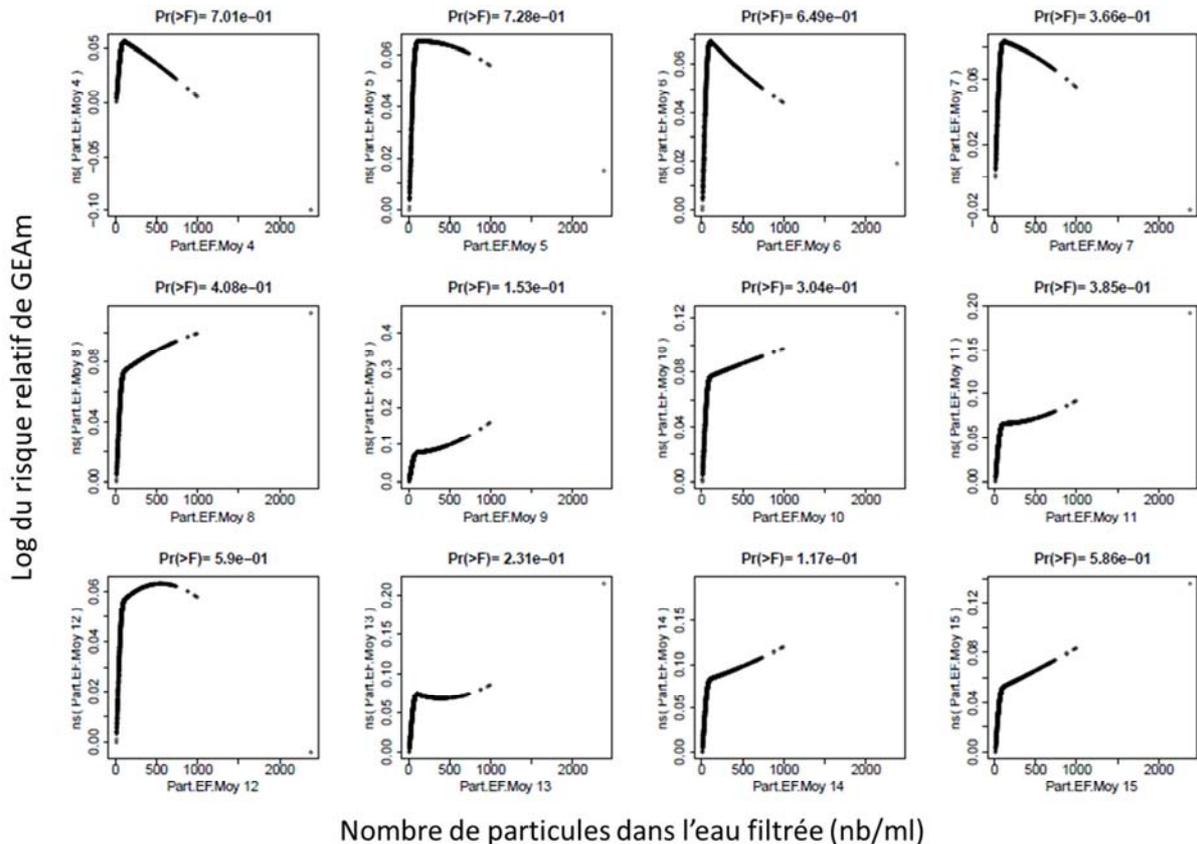


5.5.3. Nombre de particules de l'eau filtrée

Entre le minimum (10/ml) et le percentile 60 (100 /ml), la relation entre le nombre de particules dans l'eau filtrée et l'incidence des GEAm est croissante sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 31). Un point de cassure est systématiquement retrouvé au niveau du percentile 60. Au-delà, la forme de la relation est variable. Aucune des associations n'est significative ($p > 0,05$). La suppression des valeurs extrêmes ($> p98$) améliore la stabilité de la forme des relations sur l'ensemble des *lags* étudiés et conserve la partie croissante des relations. Le degré de significativité des associations est amélioré, notamment au *lag* 7 ($p < 0,05$).

I Figure 31 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-est en fonction du nombre de particules de l'eau filtrée à l'usine de Neuilly-sur-Marne, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

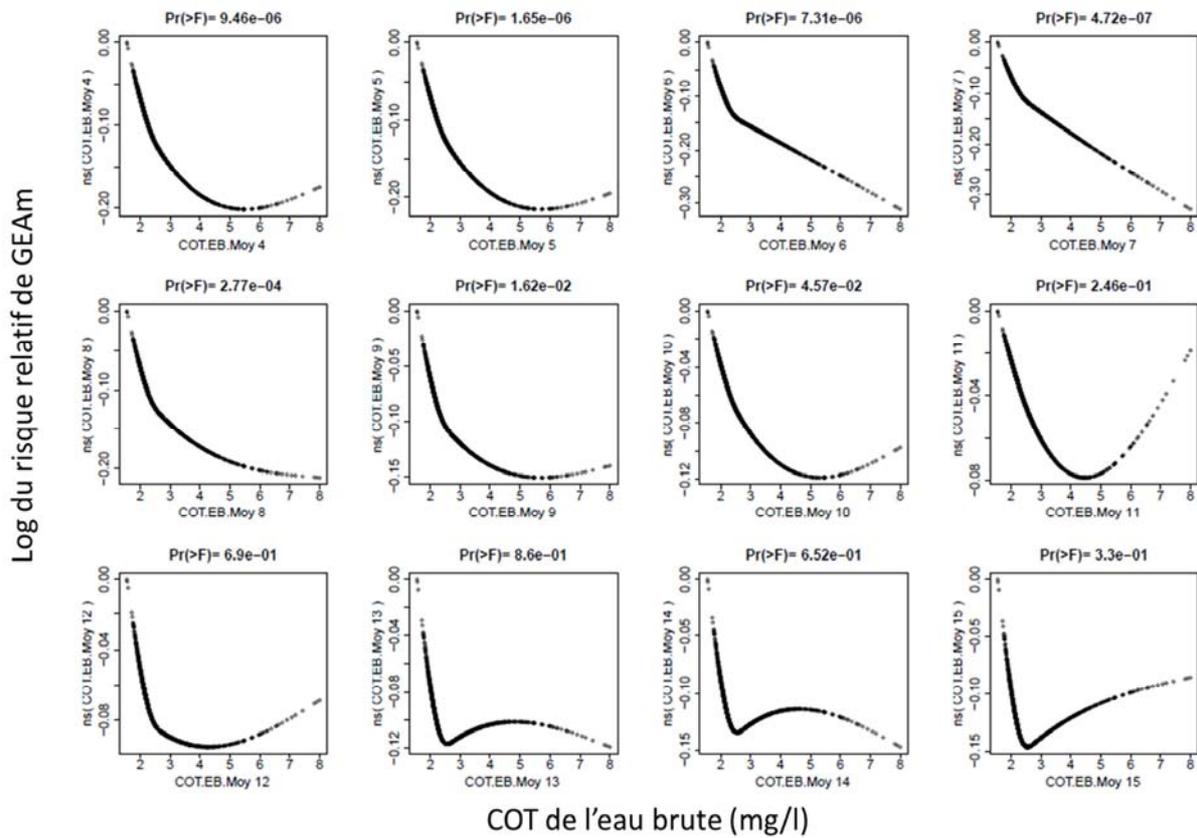


5.5.4. Carbone organique de l'eau brute

La relation entre le COT de l'eau de la Marne et l'incidence des GEAm présente une tendance globalement décroissante sur l'ensemble des lags étudiés (figure 32). Cette forme est stable entre les lags 4 et 10, sur lesquels les associations sont significatives ($p < 0,05$). La suppression des valeurs extrêmes ($> p98$) ne modifie pas la forme des relations et n'affecte pas la significativité des associations.

I Figure 32 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-est en fonction du COT de l'eau de la ressource (Marne), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

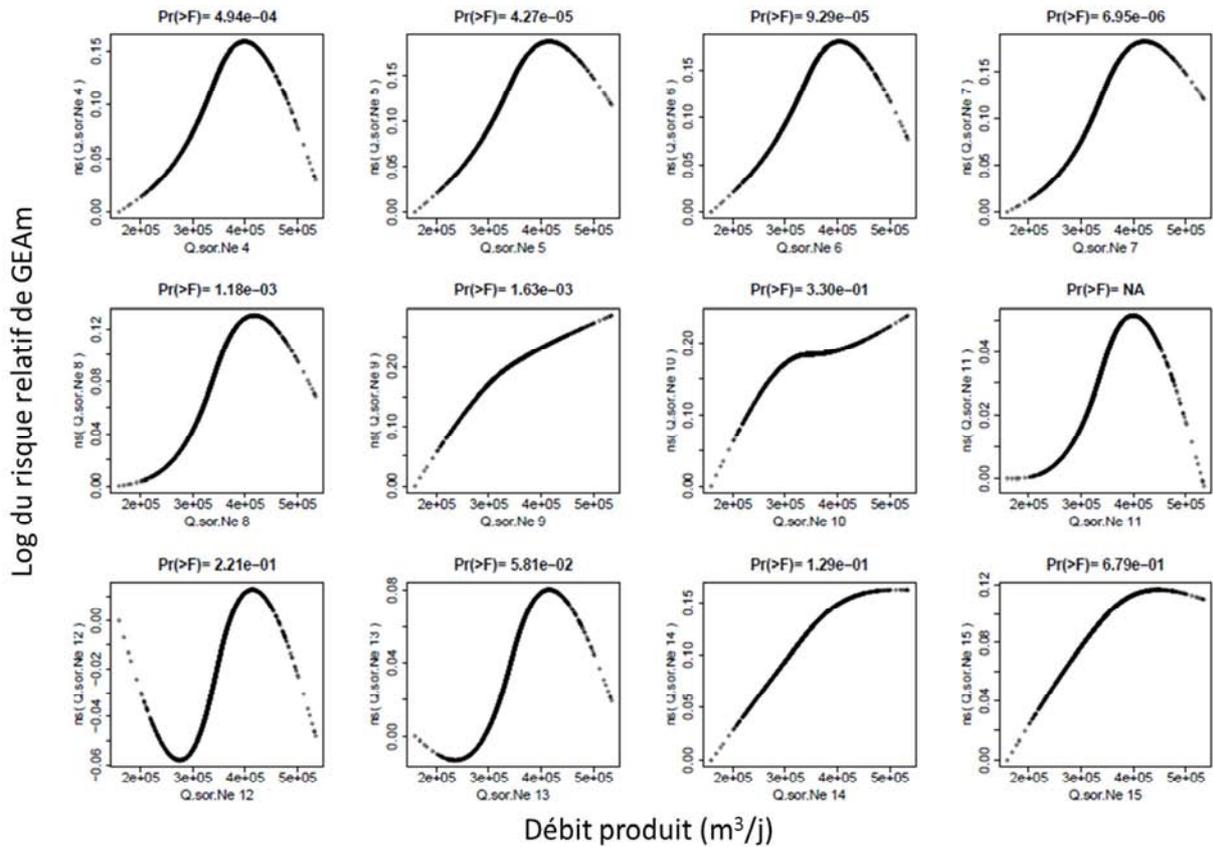


5.5.5. Débit produit

La forme de la relation entre le débit produit par l'usine de Neuilly-sur-Marne et l'incidence des GEAm présente une forme croissante entre le 10^e percentile ($2,8 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{j}$) et le 90^e percentile ($4,0 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{j}$) sur la totalité des lags étudiés (figure 33). Les associations sont significatives ($p < 0,05$) jusqu'au lag 9. La suppression des valeurs extrêmes ($> p98$) ne modifie ni les formes des relations ni la significativité des associations.

I Figure 33 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-est en fonction du débit produit par l'usine de Neuilly-sur-Marne, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

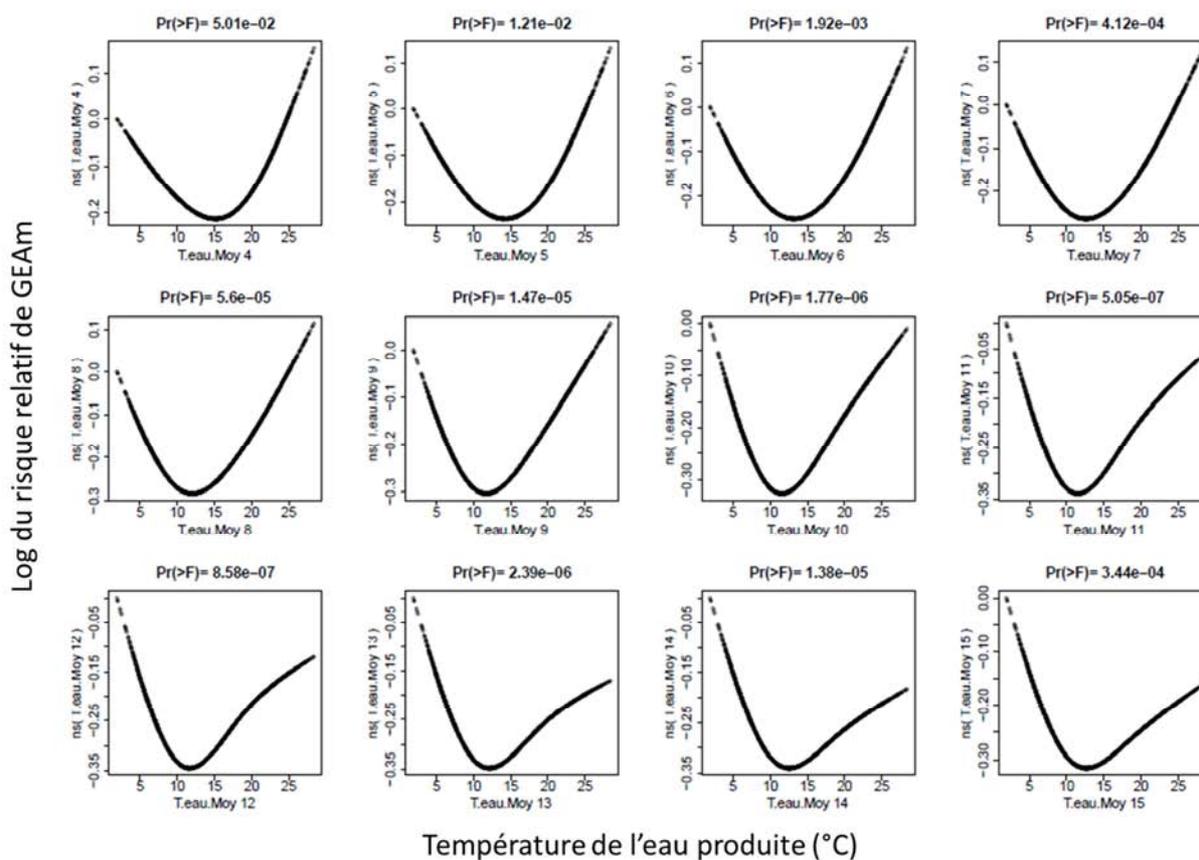


5.5.6. Température de l'eau traitée

La relation entre la température de l'eau traitée et l'incidence des GEAm est stable sur l'ensemble des lags étudiés (figure 34). Elle présente une forme en « U » avec un minimum compris entre 10 et 15 °C. Les associations sont toutes significatives ($p < 0,05$). La suppression des valeurs extrêmes n'affecte ni la forme des relations, ni la significativité des associations.

I Figure 34 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-est en fonction de la température de l'eau traitée par l'usine de Neuilly-sur-Marne, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

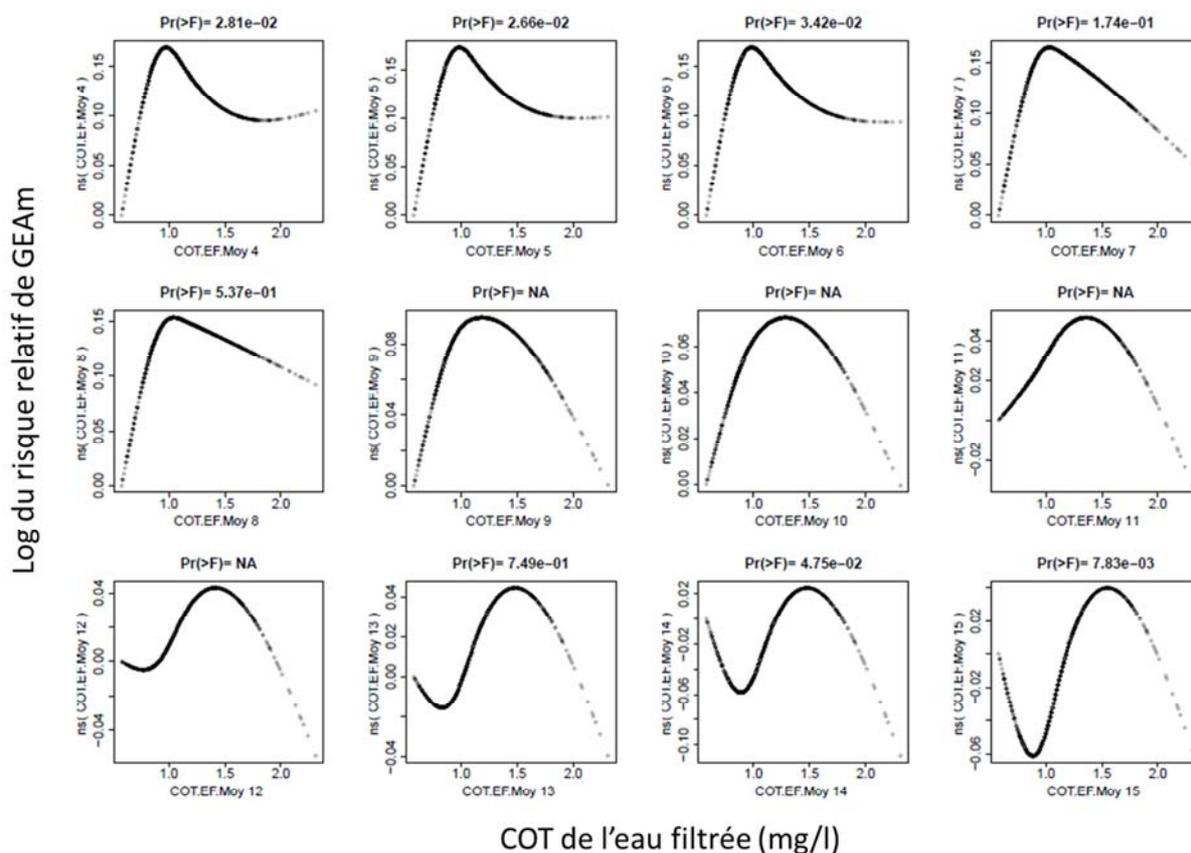


5.5.7. Carbone organique de l'eau filtrée

La relation entre le COT de l'eau filtrée et l'incidence des GEAm est stable sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 35). Sur les *lags* compris entre 4 et 11, la relation présente une forme croissante pour les plus faibles valeurs de COT (jusqu'à 1 mg/l), puis décroissante au-delà. Les associations sont significatives aux *lags* 4, 5, 14 et 15. La suppression des valeurs extrêmes (>p98) ne modifie pas la forme des relations et n'affecte pas la significativité des associations, excepté au *lag* 14.

I Figure 35 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-est en fonction du carbone organique total de l'eau filtrée à l'usine de Neuilly-sur-Marne, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007



5.6. Modélisation multi-exposition

5.6.1. Construction du modèle

Au vu des résultats obtenus lors de l'analyse exploratoire des facteurs de risques (tableau 9), les variables turbidité de l'eau brute et particules de l'eau filtrée n'ont pas été retenues pour la modélisation finale. Le COT de l'eau brute n'a pas été inclus dans le modèle du fait de la disponibilité du COT de l'eau filtrée (jugée plus représentative de la qualité de l'eau mise en distribution) et d'une forte corrélation entre ces 2 variables.

I Tableau 9 I

Synthèse de l'analyse des facteurs de risque (recherche exploratoire) sur le secteur Sedif-est et possibilité d'inclusion dans le modèle multi-exposition final

Variables		Stabilité	Significativité	Robustesse	Tendance conforme	Possibilité d'inclusion dans le modèle final
Eau brute	Débit Marne	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Turbidité	Oui	Oui	Oui	Non	Non
	COT	Oui	Oui	Oui	-	Non
Eau filtrée	Particules	Partielle	Non	Oui	Oui	Non
	COT	Oui	Partielle	Oui	-	Oui
Eau traitée	Turbidité	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
	Température	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Débit	Oui	Partielle	Oui	Oui	Oui

Les variables qu'il est possible d'inclure dans le modèle multi-exposition sont donc le débit de la Marne, le COT de l'eau filtrée, la température de l'eau, le débit produit et la turbidité de l'eau traitée.

Du fait de la concentration de deux tiers des données de la turbidité de l'eau traitée sur la valeur de 0,04 NFU et du manque de robustesse de la relation qu'entraîne la suppression des valeurs extrêmes, la turbidité de l'eau produite n'a pas été incluse dans le modèle final.

Les tests visant à rechercher les meilleures combinaisons de variables possibles (résultats non montrés) ont abouti à introduire le débit de la Marne et la température de l'eau sous la forme d'une interaction (variable à 2 dimensions). Ces tests ont également montré que la variable COT de l'eau filtrée n'apportait pas d'information utile à la modélisation du risque de GEAm, elle a donc été exclue du modèle final. La variable débit produit a été introduite sous une forme linéaire.

Au vu de la localisation des points de mesure des variables retenues (température de l'eau, débit de la Marne et débit produit) sur le parcours de l'eau, ces variables ont été moyennées sur les *lags* 6 à 8.

5.6.2. Modélisation chez les enfants

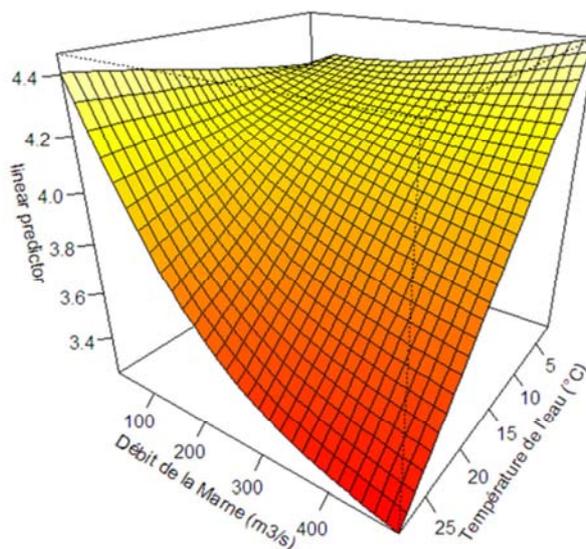
Aux fortes températures de la Marne, le risque de GEAm est plus élevé durant les périodes de faible débit de la Marne (figure 36). L'association est très significative ($p=2,3.10^{-9}$). Aux faibles températures, le risque ne semble pas être influencé par le débit de la Marne. Une variation interquartile du débit de la Marne, de 45 à 110 m³/s, induit un risque de GEAm de 0,964 IC₉₅% = [0,930–0,999] à 8,4 °C et de

0,826 IC_{95 %} = [0,775–0,881] à 19,9 °C. Ceci se traduit par une augmentation du risque de GEAm de 3,7 % IC_{95 %} = [0,1 %–7,5 %] à 8,4 °C et de 21,0 % IC_{95 %} = [13,5 %–29 %] à 19,9 °C lorsque le débit de la Marne est réduit de 110 à 45 m³/s.

Le débit produit est associé significativement à l'incidence des GEAm ($p=1,4.10^{-7}$). La relation est croissante ($r=8,7.10^{-7}$). Le risque de GEAm associé à une variation interquartile du débit produit est de 1,044 IC_{95 %} IC_{95 %} = [1,027–1,061].

I Figure 36 I

Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans du secteur Sedif-est en fonction de la température de l'eau et du débit de la Marne, modélisation multi-exposition (2002-2007)

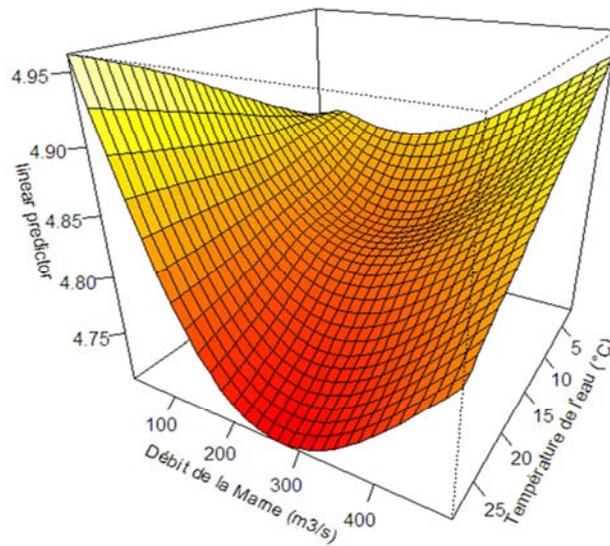


5.6.3. Test du modèle chez les adultes

La relation entre le débit de la Marne et l'incidence des GEAm adultes est globalement similaire à celle observée chez les enfants, avec un effet plus marqué du débit aux fortes températures de la Marne (figure 37). L'association est significative ($p = 3,7.10^{-3}$). On observe cependant chez les adultes une ré-augmentation du risque de GEAm aux plus fortes valeurs de débit (>p90), absente chez les enfants. La diminution du débit de la Marne, de 110 à 45 m³/s, se traduit par une augmentation du risque de GEAm de 3,8 % IC_{95 %} = [0,6 %–7,0 %] à 8,4 °C et de 8,3 % IC_{95 %} = [2,7 %–14,2 %] à 19,9 °C. Le débit produit n'est pas associé significativement à l'incidence des GEAm ($p = 0,8$).

I Figure 37 I

Variation du risque de GEAm chez les 16 ans et plus du secteur Sedif-est en fonction de la température de l'eau et du débit de la Marne, modélisation multi-exposition (2002-2007)



6. Résultats du secteur Sedif-sud

6.1. Qualité des données

Les deux indicateurs sanitaires présentent 3,1 % de données manquantes, dont un mois complet en juin 2004 (tableau 10). L'indicateur spe115 présente 8 valeurs nulles dont 4 apparaissent un dimanche. L'indicateur spe16+ présente 4 valeurs nulles dont une seule apparaît un dimanche. Le nombre moyen de cas de GEAm est 2,5 fois plus élevé chez les adultes que chez les enfants. Les données du recensement de la population 2006 (Insee, 2006) laissent apparaître un ratio adultes/enfants de 4,41.

Les variables température de l'eau et débit de la Seine ne présentent aucune valeur manquante sur la période d'étude. Le débit produit par l'usine de Choisy-le-Roi est renseigné sur l'ensemble de la période d'étude et ne présente aucune valeur nulle.

I Tableau 10 I

Caractéristiques des distributions des variables utilisées sur le secteur Sedif-sud

Variables	Unité	Valeurs manquantes (%)	Valeurs nulles (%)	Moyenne	Écart-type	Percentiles							
						Min	10	25	50	75	90	98	Max
Cas GEAm 1-15 ans	nb/j	3,1	0,4	51	41	0	8	20	44	70	102	170	281
Cas GEAm 16 ans et +		3,1	0,2	126	97	0	15	56	113	166	245	389	762
Température eau	°C	0	0	14,4	6,5	1,9	5,9	8,8	14,0	20,2	23	25,6	28,4
Débit Seine	m ³ /s	0	0	193	147	53	78	94	134	238	414	649	872
Débit produit	m ³ /j x100	0	0	375,4	51,9	165,1	313,5	347,2	375,8	402,9	437,8	491,4	696,8
Turbidité EB		1,3	0	16	22	2	4	6	9	14	30	98	224
Turbidité EF	NTU	3,8	0	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,09
Turbidité ET		0,2	0	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,14
Particules EF	nb/ml	1,6	0	51	40	5	20	25	40	65	105	165	385
COT EB	mg/l	5,5	0	2,6	0,7	1,6	2	2,2	2,4	2,8	3,4	4,8	9,6
COT EF		6,2	0	1,1	0,3	0,4	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2

EB : eau brute ; EF : eau filtrée ; ET : eau traitée.

Les chroniques de turbidité de l'eau brute, de l'eau filtrée sur sable et de l'eau traitée présentent respectivement 1,3 %, 3,8 % et 0,2 % de données manquantes. Les variables COT de l'eau brute et de l'eau filtrée présentent respectivement 5,5 % et 6,2 % de données manquantes.

6.2. Distribution des variables

6.2.1. Incidence des GEAm

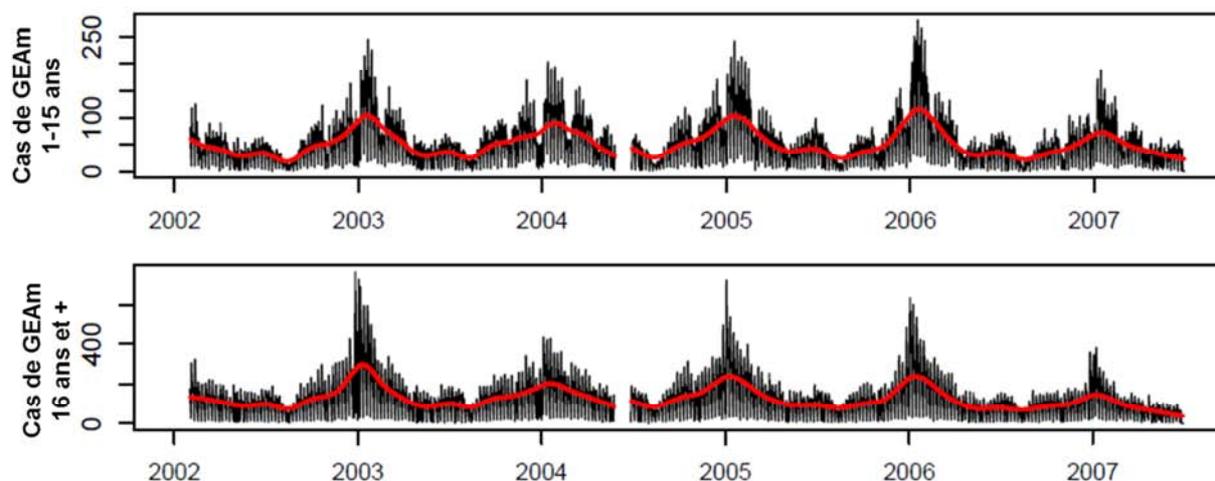
La série chronologique du nombre de cas de GEAm chez les 1-15 ans suit les pics hivernaux des épidémies de gastro-entérites (figure 38). Le maximum de 281 cas de GEAm a été observé le

16 janvier 2006 et correspond à environ 5,5 fois le nombre de cas moyen sur l'ensemble de la chronique.

Chez les adultes, le maximum de 762 cas de GEAm a été observé le 27 décembre 2002. Il correspond à 6 fois la valeur moyenne de cas de GEAm. Les épidémies hivernales de 2003, 2005 et 2006 ont été particulièrement marquées. Ces résultats sont comparables à ceux observés sur les autres secteurs en région Ile-de-France durant la même période (paragraphe 4.2.1 et 5.2.1).

I Figure 38 I

Nombre de cas quotidiens de GEAm résidants sur le secteur Sedif-sud, 2002-2007

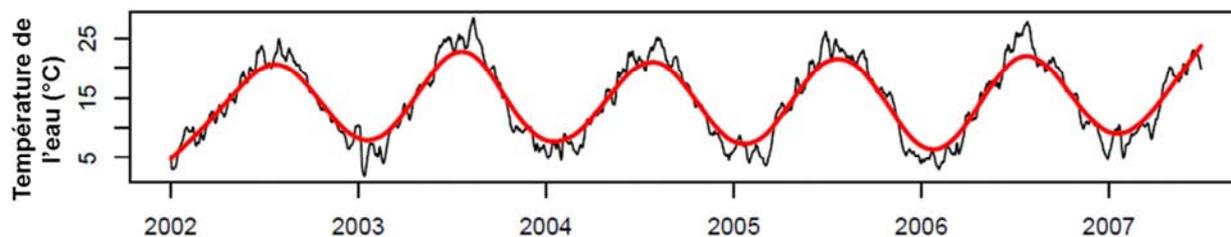


6.2.2. Température de l'eau

La chronique de température de l'eau traitée à Choisy-le-Roi (figure 39) présente une saisonnalité identique aux précédentes chroniques de température (figure 3 et figure 23). Le maximum de température de l'eau de 28,4 °C était mesuré le 13 août 2003 et le minimum de 1,9 °C le 13 janvier 2003.

I Figure 39 I

Séries temporelles de la température de l'eau traitée par l'usine de Choisy-le-Roi, 2002-2007



6.2.3. Eaux brutes

Les données d'autocontrôle de l'usine de Choisy-le-Roi ont été utilisées afin d'évaluer la qualité microbiologique de l'eau de la Seine sur la période 2002-2007. Les paramètres coliformes totaux, coliformes fécaux, entérocoques et spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices ont été retenus

afin d'évaluer d'une part le niveau de contamination microbiologique général et d'autre part le niveau de contamination microbiologique d'origine fécale (tableau 11).

Le niveau de contamination moyen de la Seine à Choisy-le-Roi par les coliformes fécaux est de 1 580 UFC/100 ml, soit similaire à celui de l'Oise et nettement inférieur à celui de la Marne, et celui des entérocoques est trois fois moindre (519 UFC/100 ml).

La Seine à Choisy-le-Roi présente un niveau de contamination microbiologique général assez faible moyen avec 7 787 UFC/100 ml de coliformes totaux et un 90^e percentile de 18 000 UFC/100 ml.

I Tableau 11 I

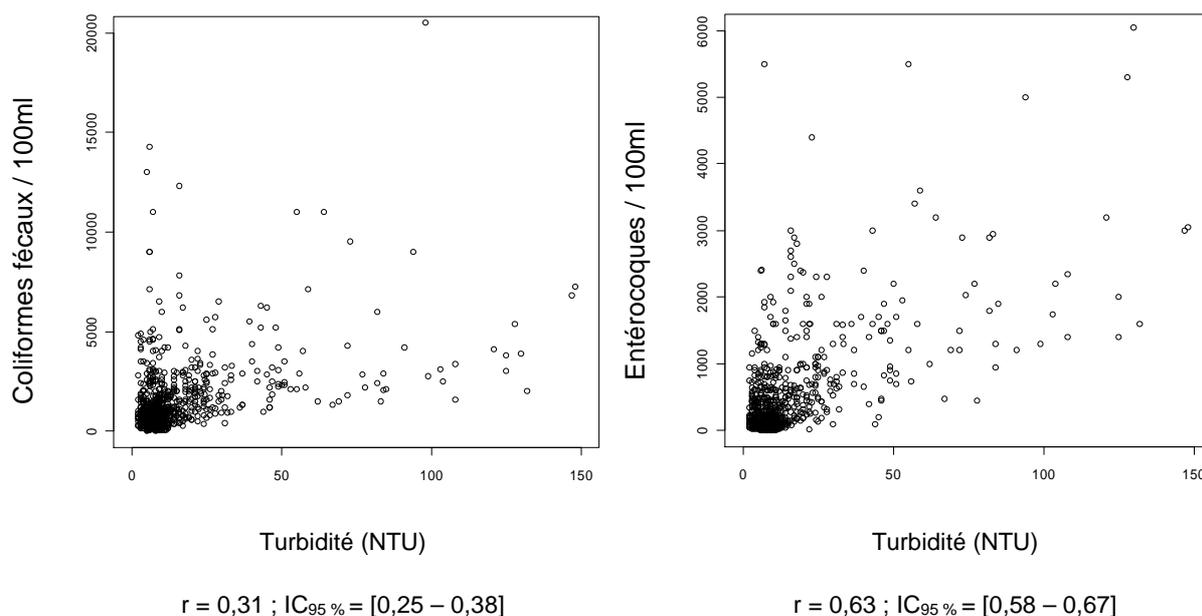
Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes de la Seine à Choisy-le-Roi, 2002-2007

Paramètre	Nombre d'analyses	Moyenne	Écart-type	Min	Percentiles						
					10	25	50	75	90	98	Max
Coliformes totaux/100ml	846	7 787	9 861	100	1 015	2 100	4 500	9 575	18 000	40 000	90 000
Coliformes fécaux/100ml	839	1 580	2 439	0	200	416	983	1 930	3 221	7 100	43 000
Entérocoques/100ml	846	519	795	0	30	70	210	630	1 400	2 956	7 400
Spores BASF/100ml	843	81	89	0	22	33	54	90	160	359	800

Les analyses de régression réalisées montrent une corrélation entre la turbidité de l'eau de la Seine et la concentration en entérocoques et une corrélation faible avec la concentration en coliformes fécaux (figure 40).

I Figure 40 I

Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes de la Seine à Choisy-le-Roi en fonction de la turbidité, période 2002-2007

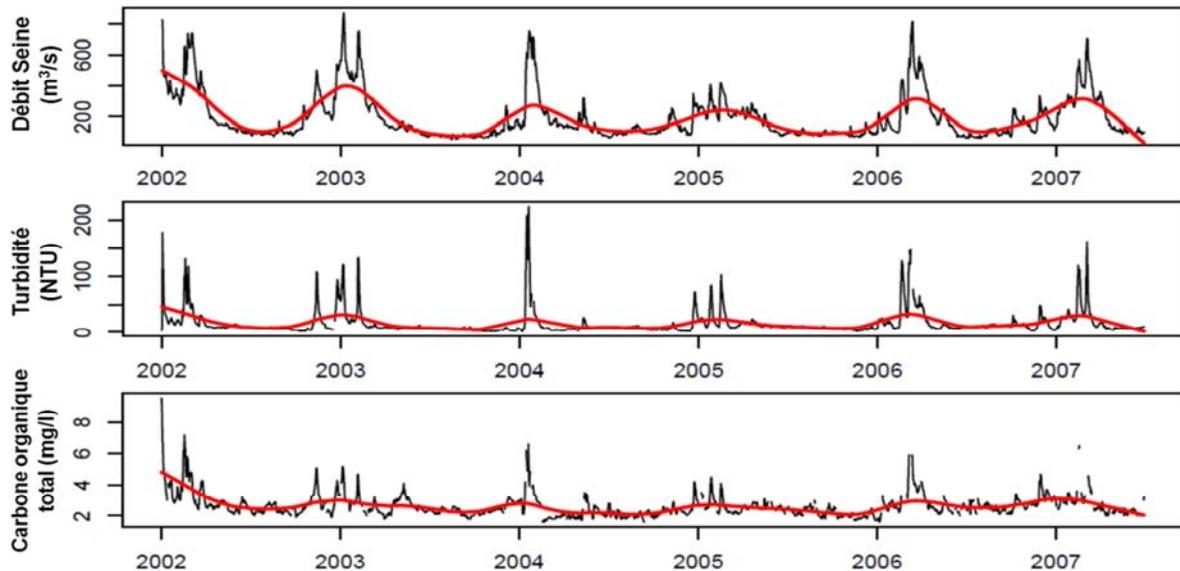


Données censurées à droite à 20 000 UFC/100 ml pour les coliformes fécaux, 6 000 UFC/100 ml pour les entérocoques et 150 NTU pour la turbidité.

Les chroniques de turbidité, de débit et de COT de la Seine présentent une saisonnalité similaire (figure 41). Les crues hivernales sont accompagnées de pics de la turbidité et du COT marquant la dégradation de la qualité de l'eau. Lors des pics hivernaux, les niveaux de turbidité dépassent régulièrement les 100 NTU (p98 à 98 NTU) contre 16 NTU en moyenne. Les pics hivernaux de débit représentent entre 3 et 4 fois le débit moyen de la Seine.

I Figure 41 I

Séries temporelles du débit, turbidité et COT des eaux de la Seine à Choisy-le-Roi, 2002-2007

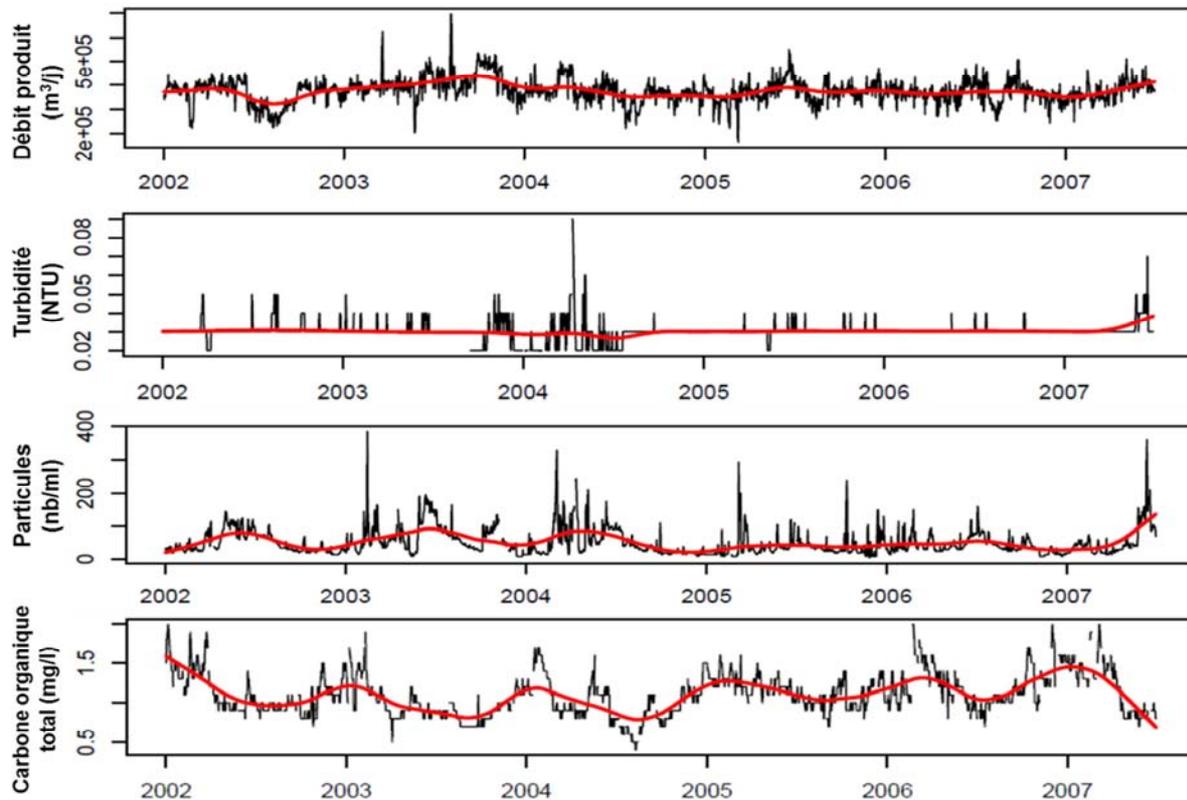


6.2.4. Eaux traitées

La production moyenne de l'usine de Choisy-le-Roi est d'environ 375 500 m³/j. Cette production est stable sur l'ensemble de la période d'étude (figure 42). Les maximums de production sont globalement observés en été. Le maximum a été observé le 5 août 2003 avec un niveau de plus de 696 000 m³/j. L'usine a fonctionné constamment durant la période d'étude.

I Figure 42 I

Séries temporelles du débit produit, de la turbidité, du nombre de particules et du COT des eaux filtrées à l'usine de Choisy-le-Roi, 2002-2007



À la sortie des filtres à sable, l'eau présente une turbidité moyenne de 0,03 NTU et un maximum de 0,09 NTU, observé une seule fois le 10 avril 2004 (figure 42). Le percentile 98 est à 0,04 NTU. La moyenne est stable sur la période 2002-2007. La turbidité moyenne de l'eau mise en distribution est stable autour de la valeur de 0,03 NTU.

La chronique des concentrations en particules de l'eau filtrée montre des pics qui n'ont pas forcément lieu lors des périodes hivernales. Ces pics représentent environ entre 3 et 7 fois le niveau moyen de 51 particules par ml. Le maximum de 385 particules par ml a été observé le 12 février 2003.

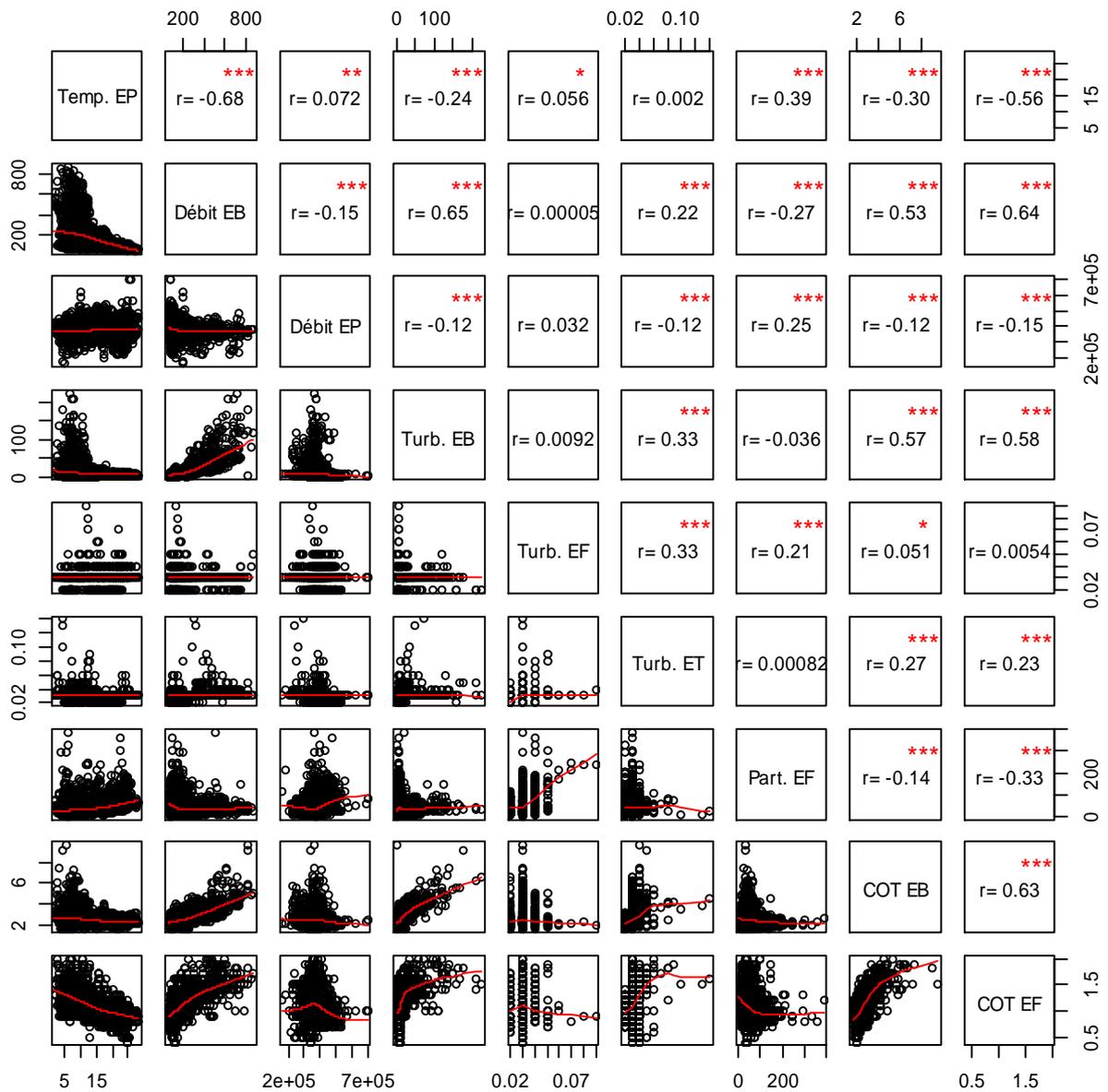
La chronique des mesures du COT de l'eau filtrée présente une tendance moyenne autour de 1,1 mg/l. Les pics hivernaux de 2002, 2006 et 2007 sont particulièrement marqués, notant une dégradation de la qualité de la ressource (figure 42).

6.3. Corrélation entre covariables

Les corrélations entre les covariables disponibles pour le secteur Sedif-sud ont été testées par la méthode de Spearman (figure 43). La turbidité de l'eau traitée apparaît corrélée avec la turbidité de l'eau filtrée ($r=0,33$, $p<0,001$) ainsi qu'avec le débit de l'eau brute ($r=0,22$, $p<0,001$). Le nombre de particules est corrélé avec la turbidité de l'eau filtrée ($r=0,21$, $p<0,001$) mais pas avec la turbidité de l'eau traitée ($r<0,01$, $p>0,1$).

I Figure 43 I

Matrice des corrélations entre covariables utilisables pour le secteur Sedif-sud



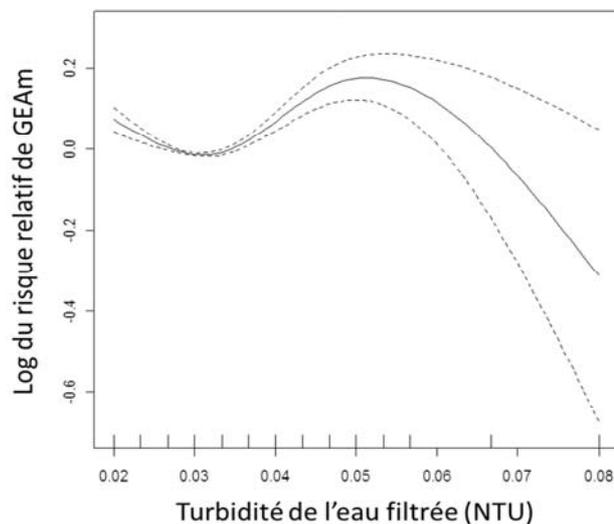
Le « r » est calculé selon la méthode de Spearman : * = $p < 0,1$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$.
 EB = eau brute ; EF = eau filtrée ; EP = eau traitée.

6.4. Relation entre la turbidité des eaux et l'incidence des GEAm

Les tests réalisés avec la variable turbidité de l'eau filtrée par l'usine de Choisy-le-Roi (moyenne des *lags* 6 à 8) sur le nombre de cas incidents de GEAm observés chez les 1-15 ans incluaient un contrôle de la température de l'eau (moyenne des *lags* 6 à 8). La relation présente une partie croissante entre 0,03 et 0,05 NFU puis est décroissante au-delà (figure 44). L'association est significative ($p=0,002$). L'exclusion des valeurs extrêmes de turbidité ($>p98$) n'impacte ni la partie croissante de la relation entre 0,03 et 0,04 NFU ($p98$), ni la significativité de l'association ($p=0,001$).

I Figure 44 I

Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans du secteur Sedif-sud en fonction de la turbidité de l'eau filtrée (sable) à Choisy-le-Roi, avec une latence moyenne de l'effet de 6-8 jours, 2002-2007



Les tests réalisés sur la variable turbidité de l'eau traitée mettent en évidence une relation avec l'incidence des GEAm de forme plane (résultats non montrés). L'association n'est pas significative ($p=0,79$). De ce fait, les analyses sur cette variable n'ont pas été poussées plus loin.

6.5. Recherche d'autres facteurs de risque

Dans une seconde étape de l'analyse, chacune des covariables d'exposition a été testée comme variable explicative dans le modèle, sur différents décalages temporels (du *lag* 5 au *lag* 15). Le degré de significativité statistique de l'association et l'adéquation par rapport à la forme attendue de la relation ont été appréciés pour chaque test (tableau 12).

I Tableau 12 I

Résultats de l'analyse statistique des associations entre l'incidence des GEAm chez les 1-15 ans et les variables d'exposition utilisées sur le secteur Sedif-sud, pour différentes latences de l'effet, 2002-2007

Variables	Jeu de données	Latences											Tendance attendue		
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
Eau brute	Débit Seine	<i>p</i> 100	2	2	2	1			2	2	2	2	2		↗
		<i>p</i> 98	2	2	2	1			2	2	1	1	1		
	Turbidité	<i>p</i> 100	4	4	3	2		1	1						↗
		<i>p</i> 98	2	3	2	1	1	1	1	1					
	COT	<i>p</i> 100	3	3	3	1									↗
		<i>p</i> 98	4	5	4	1									
Eau filtrée	Turbidité	<i>p</i> 100		1			1	1			4	1		↗	
		<i>p</i> 98		2				1	1	3	3	1	1		
	Particules	<i>p</i> 100	1	1	3	3	3	2						↗	
		<i>p</i> 98	1	1	3	3	4	3							
	COT	<i>p</i> 100	1	1	1	1	1							↗	
		<i>p</i> 98	1	1	2	4	2	2	2	1	1	1			
Eau traitée	Température	<i>p</i> 100				1	2	2	4	5	6	5	5	U	
		<i>p</i> 98			1	2	3	3	4	6	6	6	5		
	Débit produit	<i>p</i> 100	7	6	6	7								↗	
		<i>p</i> 98	7	6	6	7									
	Turbidité	<i>p</i> 100												↗	
		<i>p</i> 98													

Forme de la relation conforme à la tendance attendue.

Forme de la relation partiellement conforme à la tendance attendue.

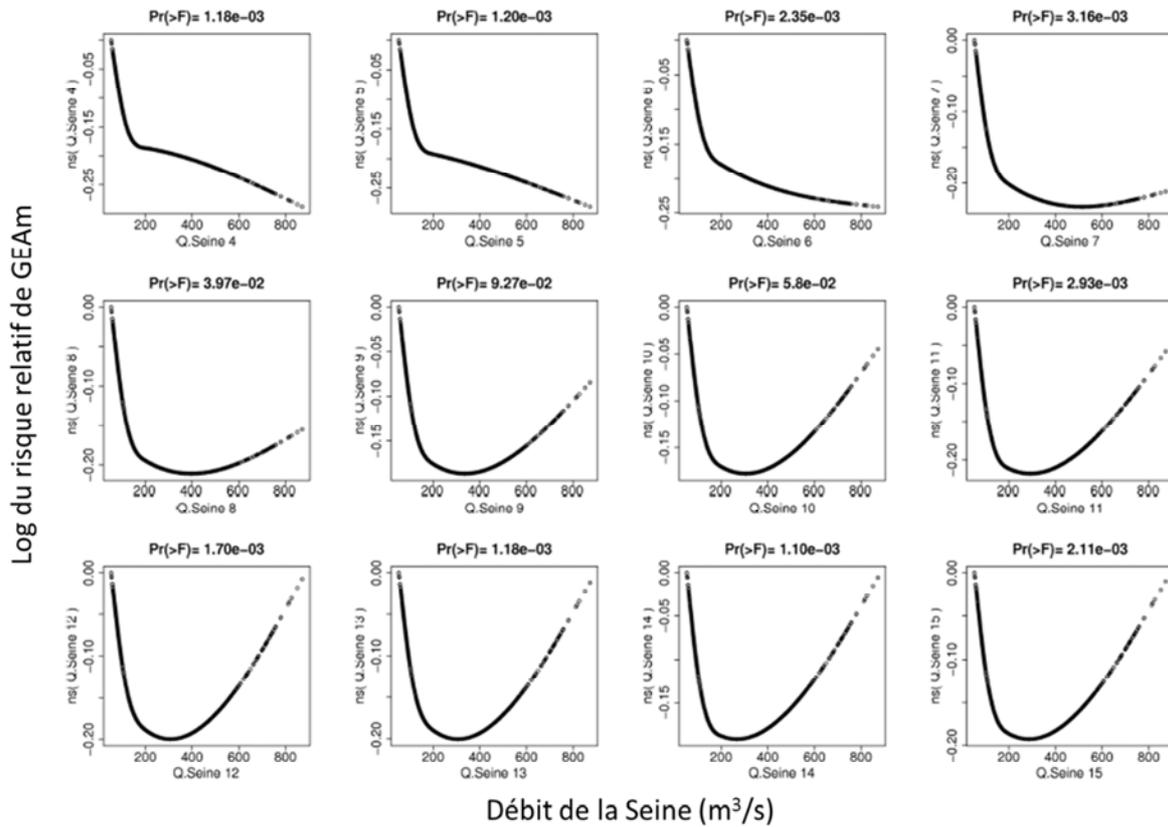
Le chiffre indique le degré de significativité (1 = $p < 0,1$; 2 = $p < 0,01$; 3 = $p < 0,001$; 4 = $p < 0,0001$; etc.).

6.5.1. Débit de la Seine

La relation entre le débit de la Seine et l'incidence des GEAm est en forme de « U » et stable du *lag* 7 au *lag* 15 (figure 45). Le minimum est compris entre 200 et 400 m³/s selon le *lag* considéré. Sur les *lags* précoces, la branche croissante est moins marquée. Elle s'accroît vers les *lags* plus tardifs. Toutes les associations sont significatives ($p < 0,05$) exceptées aux *lags* 9 et 10 ($p < 0,1$). La suppression des valeurs de débit supérieures au percentile 98 ne modifie ni la forme des relations, ni la significativité.

I Figure 45 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 du secteur Sedif-sud en fonction du débit de la ressource (Seine), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

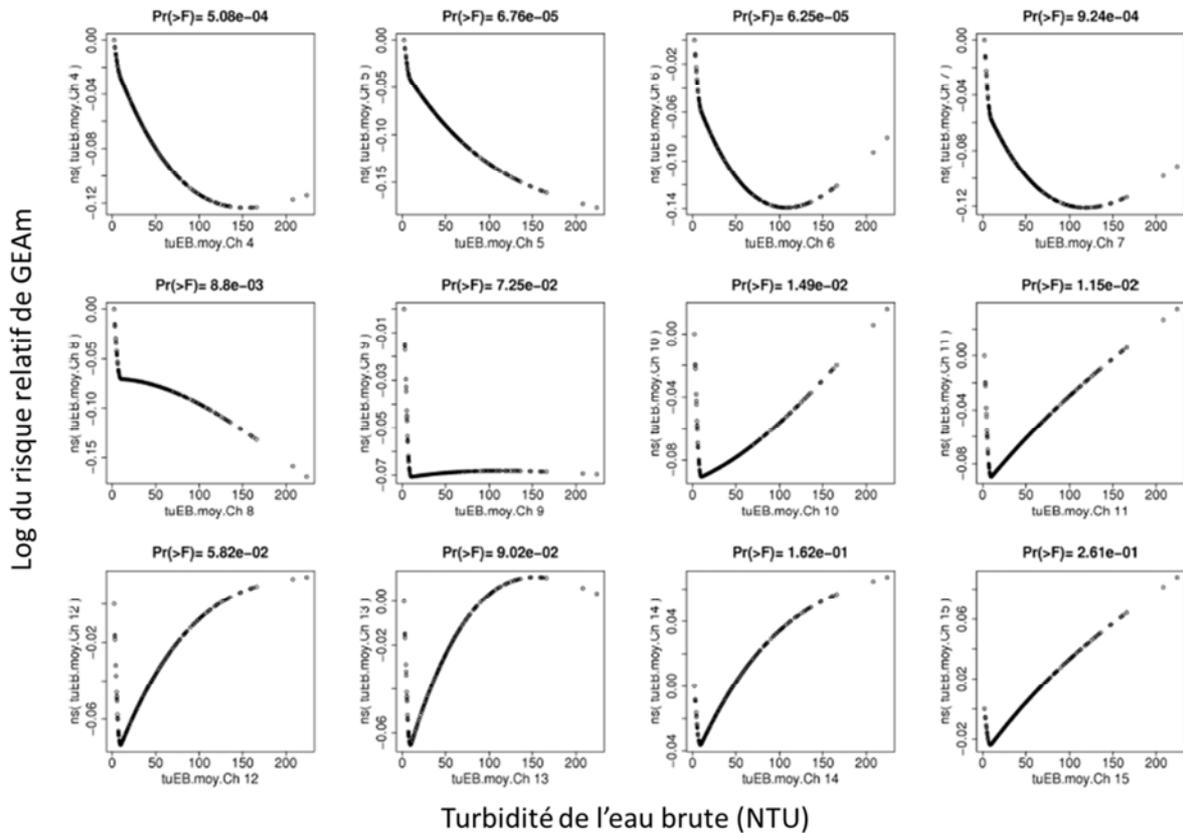


6.5.2. Turbidité de l'eau brute

La forme de la relation entre la turbidité de la Seine et l'incidence des GEAm varie en fonction du lag considéré. Elle est principalement décroissante entre les lags 4 et 8 puis croissante à partir du lag 10 (figure 46). Les associations sont significatives sur les lags 4 à 8 puis 10 et 11. La suppression des valeurs extrêmes (>p98) ne modifie pas les relations aux lags précoces et tend à aplanir la forme des relations à partir du lag 8.

I Figure 46 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sédif-sud en fonction de la turbidité de l'eau de la ressource (Seine), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

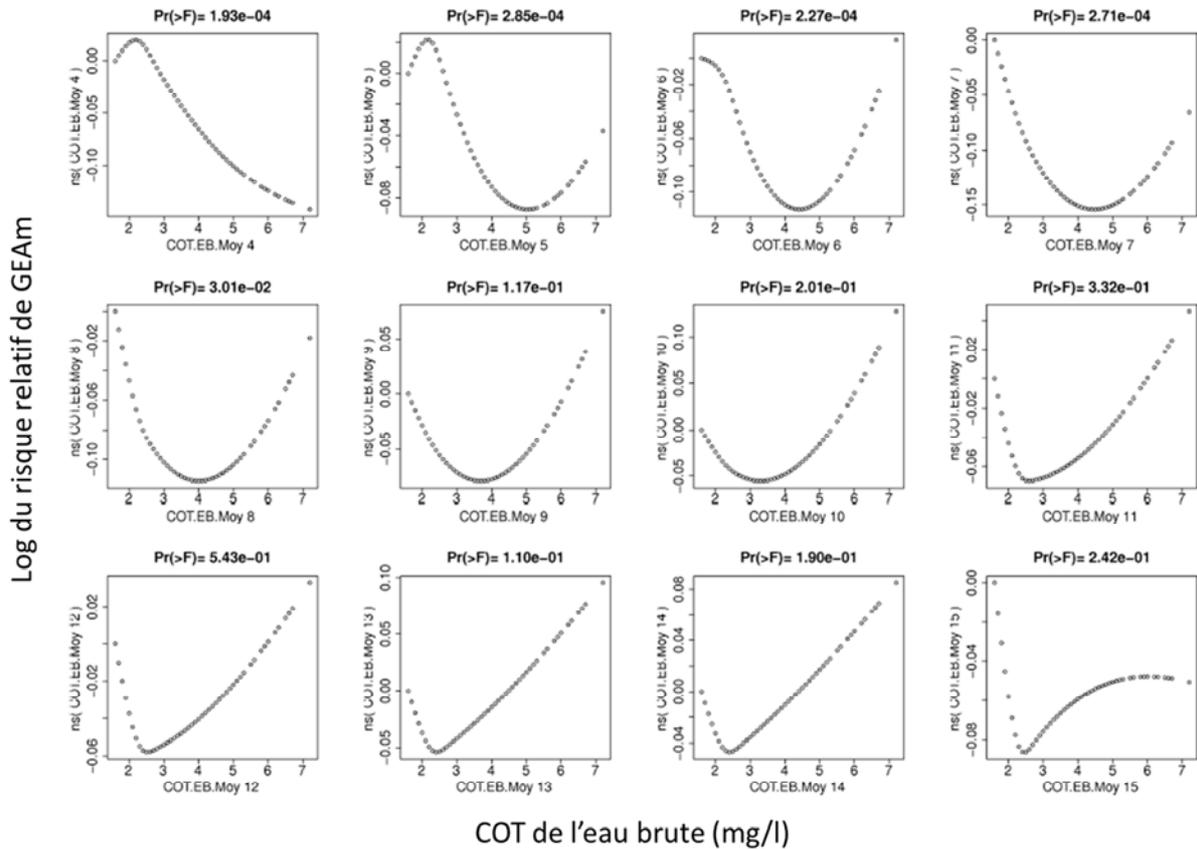


6.5.3. Carbone organique de l'eau brute

Les relations entre le COT de l'eau brute et l'incidence des GEAm sont stables sur la plage de lags 5 à 15 (figure 47). Elles sont en forme de « U » avec un minimum qui varie entre 2 mg/ml (lags tardifs) et 5 mg/ml (lags précoces). Les associations sont significatives pour les lags 4 à 8. La suppression des valeurs extrêmes de COT rend totalement décroissante les relations aux lags 5 à 8. Les associations à ces lags restent significatives ($p < 0,05$).

I Figure 47 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sédif-sud en fonction du carbone organique total de l'eau de la ressource (Seine), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

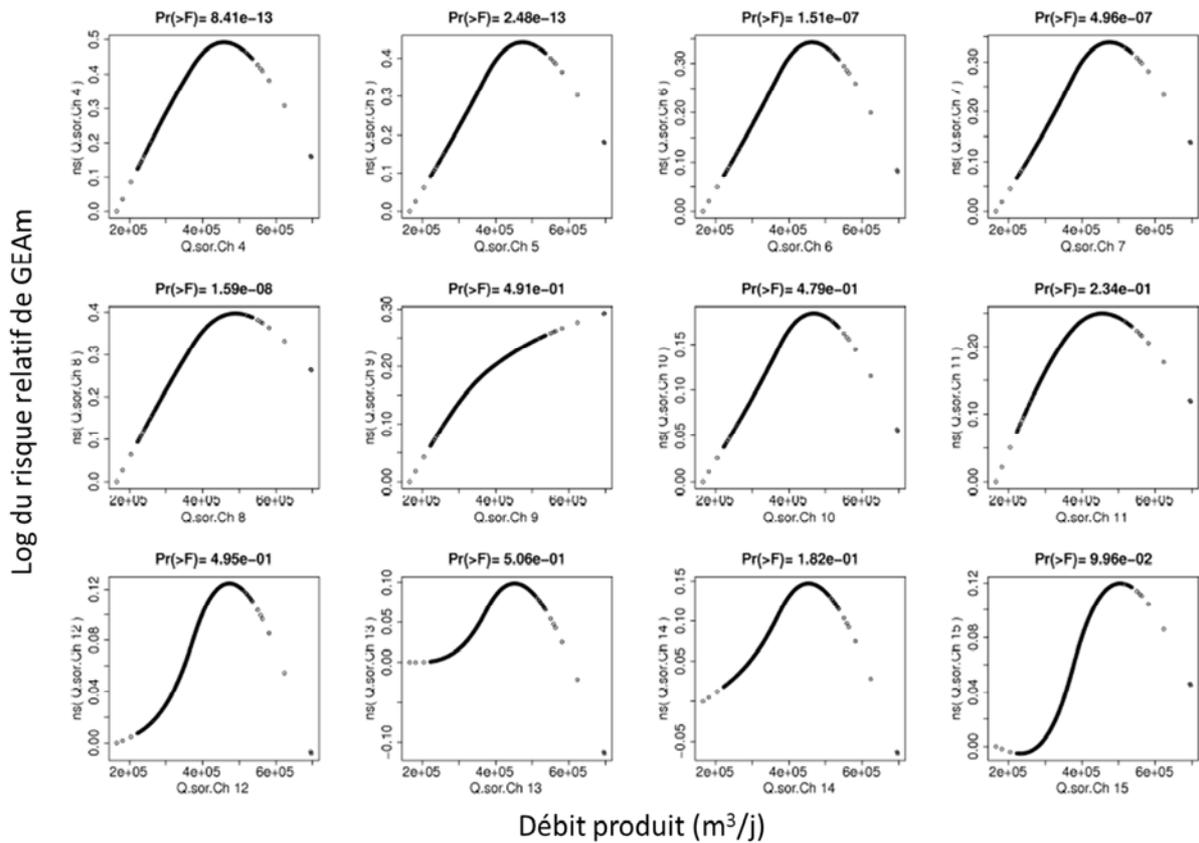


6.5.4. Débit produit

La forme de la relation entre le débit produit par l'usine de Choisy-le-Roi et l'incidence des GEAm est croissante sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 48). Les associations sont significatives entre les *lags* 4 et 8 ($p < 0,05$) et même très significatives aux *lags* 4 et 5 ($p < 1.10^{-13}$). La suppression des valeurs extrêmes ne modifie ni la forme des relations, ni l'ordre de grandeur de la significativité des associations.

I Figure 48 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sédif-sud en fonction du débit produit par l'usine de Choisy-le-Roi, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

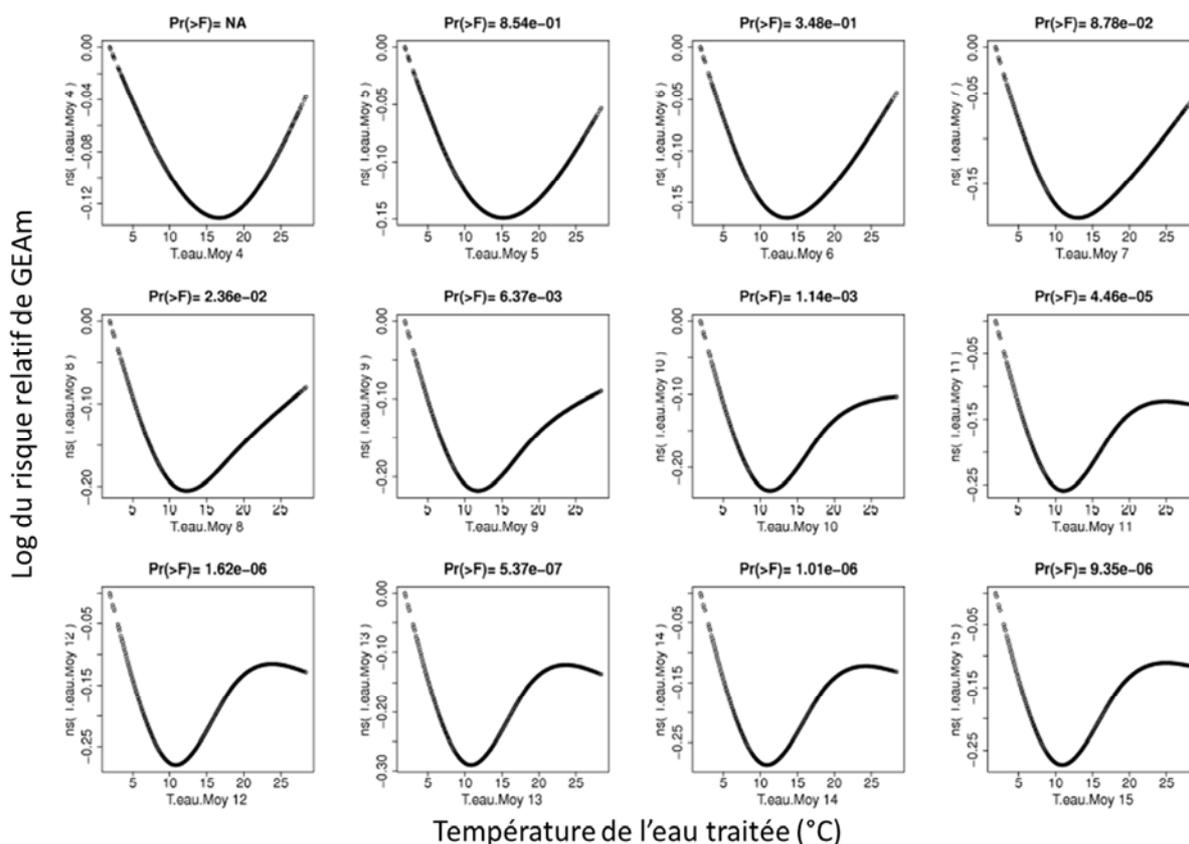


6.5.5. Température de l'eau traitée

La relation entre la température de l'eau et l'incidence des GEAm est stable sur l'ensemble des *lags* étudiés et présente une forme en « U » avec un minimum compris entre 10 et 15 °C (figure 49). Les associations sont significatives à partir du *lag* 8. La suppression des valeurs supérieures au percentile 98 (28,4 °C) ne modifie pas la forme des relations. L'association au *lag* 7 devient significative.

I Figure 49 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sédif-sud en fonction de la température de l'eau traitée par l'usine de Choisy-le-Roi, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

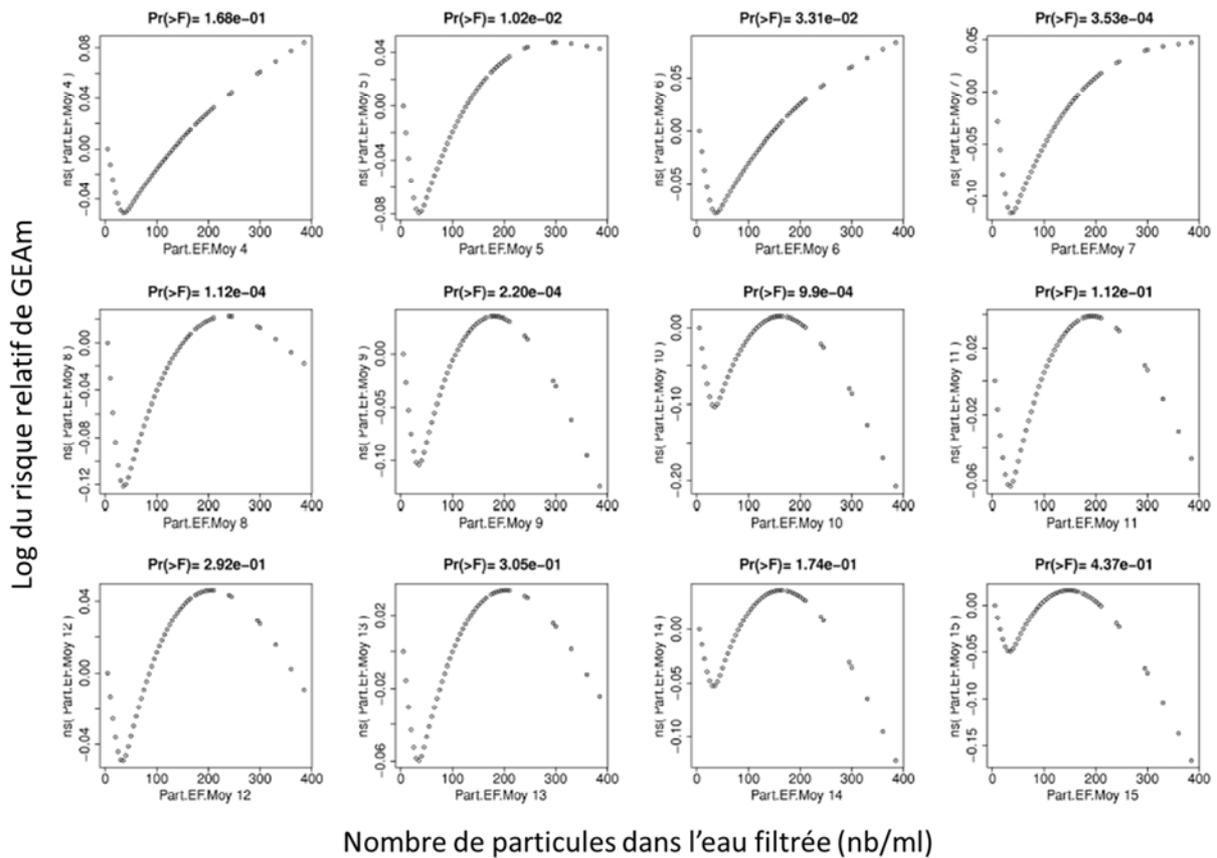


6.5.6. Nombre de particules de l'eau filtrée

La relation entre le nombre de particules dans l'eau filtrée et l'incidence des GEAm présente une forme stable sur l'ensemble des lags et croissante entre 30 et 300 particules par ml (figure 50). Les associations sont significatives jusqu'au lag 10. La suppression des valeurs extrêmes (>165/ml) ne modifie ni la forme des relations, ni l'ordre de grandeur de la significativité des associations.

I Figure 50 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-sud en fonction du nombre de particules de l'eau filtrée à l'usine de Choisy-le-Roi, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

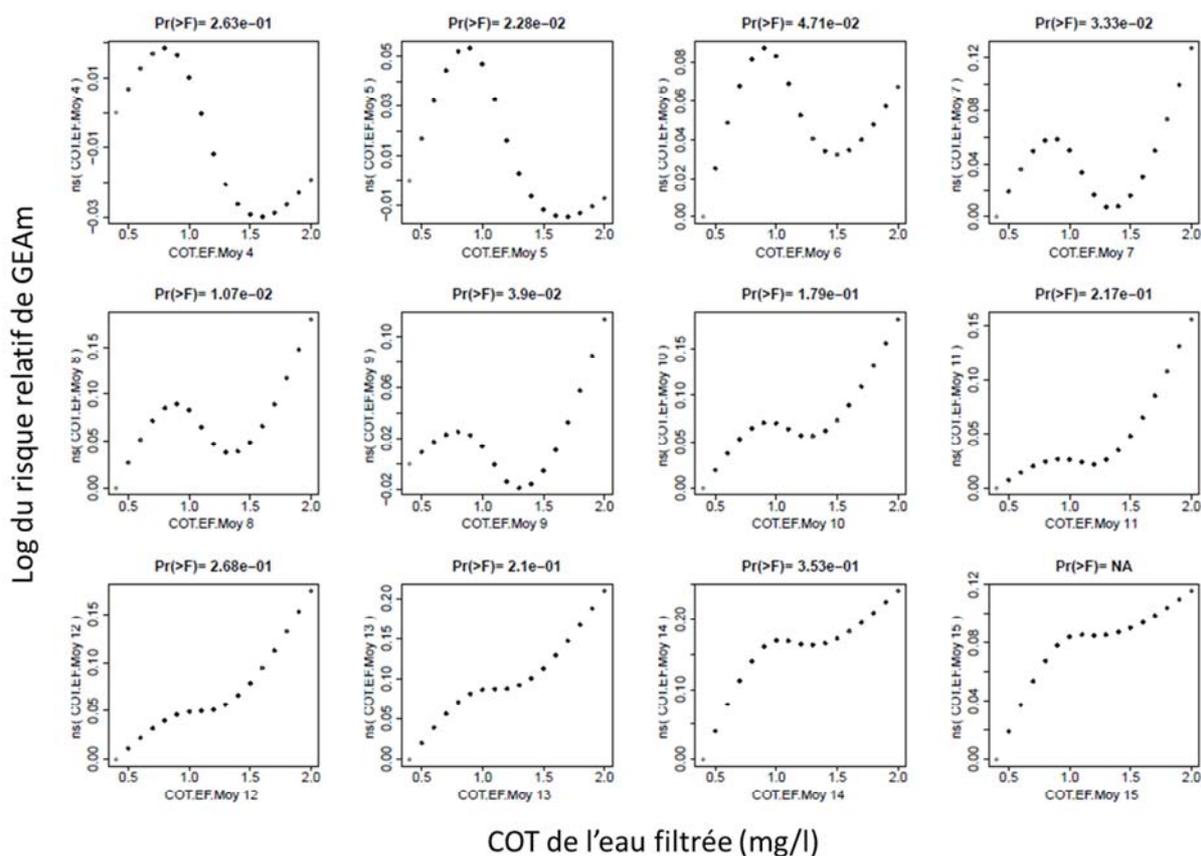


6.5.7. Carbone organique de l'eau filtrée

La relation entre le COT mesuré en sortie des filtres à sable et l'incidence des GEAm est instable sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 51). Elle comporte une partie croissante entre le minimum (0,4 mg/ml) et le percentile 50 (1,1 mg/ml), puis présente ensuite une forme en « U » avec un minimum aux alentours de 1,5 mg/ml (p90). Les associations comprises entre les *lags* 4 et 9 sont significatives. La suppression des valeurs extrêmes (>1,7 mg/ml) ne modifie pas la forme des relations mais améliore la significativité des associations.

I Figure 51 I

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-sud en fonction du carbone organique total de l'eau filtrée à l'usine de Choisy-le-Roi, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007



6.6. Modélisation multi-exposition

6.6.1. Construction du modèle

Au vu des résultats obtenus lors de l'analyse exploratoire des facteurs de risques, les variables turbidité de l'eau brute, turbidité de l'eau filtrée, COT de l'eau brute et COT de l'eau filtrée n'ont pas été retenues pour la modélisation finale (tableau 13).

Le modèle multi-exposition final contient donc le débit de la Seine, le nombre de particules de l'eau filtrée, la température de l'eau traitée et le débit produit. Au vu de la localisation des points de mesure de ces variables sur le parcours de l'eau, ces variables ont été introduites dans le modèle sous la forme d'une moyenne des *lags* 6 à 8.

I Tableau 13 I

Synthèse de l'analyse des facteurs de risque (recherche exploratoire) sur le secteur Sedif-sud et possibilité d'inclusion dans le modèle multi-exposition final

Variables		Stabilité	Significativité	Robustesse	Tendance conforme	Possibilité d'inclusion dans le modèle final
Eau brute	Débit Seine	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Turbidité	Non	Oui	Non	Non	Non
	COT	Oui	Oui	Non	Non	Non
Eau filtrée	Turbidité	Oui	Non	-	Partielle	Non
	Particules	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	COT	Oui	Partielle	Oui	Non	Non
Eau traitée	Température eau	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Débit produit	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

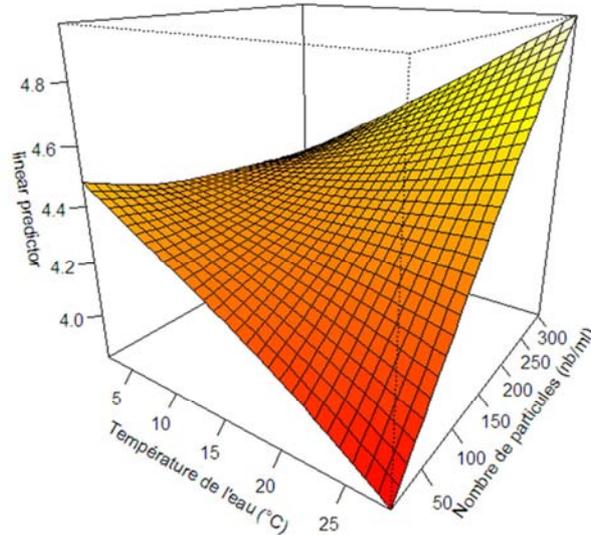
Les tests visant à rechercher les meilleures combinaisons de variables possibles (résultats non montrés) ont abouti à l'introduction du nombre de particules et de la température de l'eau sous la forme d'une interaction (variable à 2 dimensions). Comme dans les autres modèles, le débit produit a été introduit dans le modèle sous une forme linéaire.

6.6.2. Modélisation chez les enfants

Le risque de GEAm croit avec l'augmentation du nombre de particules dans l'eau (figure 52) et lorsque les températures de l'eau sont supérieures à 10 °C. L'augmentation de la température de l'eau accentue l'effet des particules sur le risque de GEAm. L'association est significative ($p=2,2.10^{-10}$). L'augmentation interquartile du nombre de particules est associée à une variation de risque significative en période chaude seulement. Lorsque l'eau est à 20,2 °C, le risque de GEAm a été estimé à 1,094 IC_{95 %} = [1,055–1,134] alors qu'à 8,8 °C, il est de 0,997 IC_{95 %} = [0,972–1,023].

I Figure 52 I

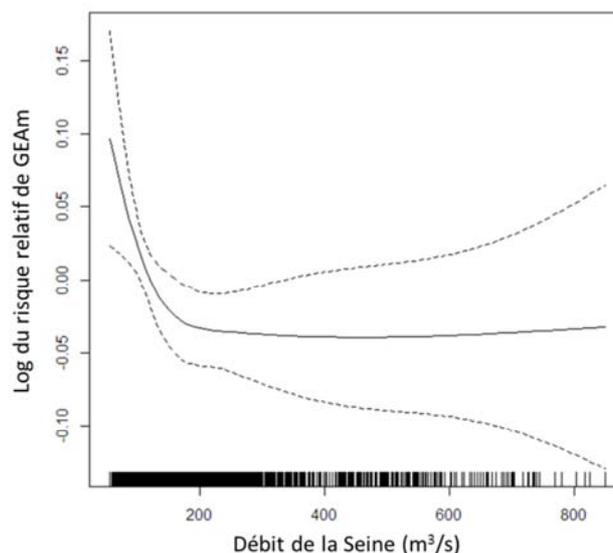
Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans du secteur Sedif-sud en fonction de la température de l'eau traitée et du nombre de particules dans l'eau filtrée, modélisation multi-exposition (2002-2007)



La relation entre le débit de la Seine et l'incidence des GEAm présente une forme décroissante entre le minimum (53m³/s) et le percentile 70 (213 m³/s). Au-delà, la forme de la relation est plane (figure 53). L'association n'est pas significative (p=0,051). Le risque de GEAm associé à une augmentation interquartile du débit est de 0,936 IC_{95 %} = [0,892–0,982], ce qui se traduit par une augmentation du risque de GEAm de 6,9 % IC_{95 %} = [1,9 %–12,2 %] lorsque le débit diminue de 238 à 94 m³/s.

I Figure 53 I

Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans du secteur Sedif-sud en fonction du débit de la Seine mesuré à Choisy-le-Roi, modélisation multi-exposition (2002-2007)



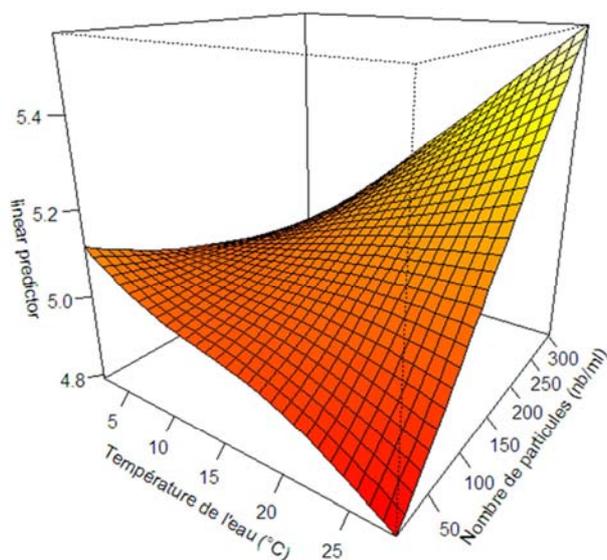
La relation entre le débit produit par l'usine de Choisy-le-Roi et l'incidence des GEAm est croissante et de pente $r=1,16.10^{-6}$. L'association est très significative ($p=4,6.10^{-10}$). Le risque associé à une variation interquartile du débit produit est de 1,067 IC_{95 %} = [1,045–1,088].

6.6.3. Test du modèle chez les adultes

Comme chez les enfants, la relation entre le nombre de particules dans l'eau filtrée et l'incidence des GEAm est croissante dès lors que la température de l'eau est supérieure à 10 °C (figure 54). Cette association est significative ($p=1,4.10^{-3}$). Une augmentation interquartile du nombre de particules est liée à un risque de 1,053 IC_{95 %} = [1,014–1,093] lorsque la température de l'eau est de 20,2 °C. En période froide, lorsque l'eau est à 8,8 °C, le risque de GEAm, de 1,005 IC_{95 %} = [0,978–1,032], n'est pas significatif.

I Figure 54 I

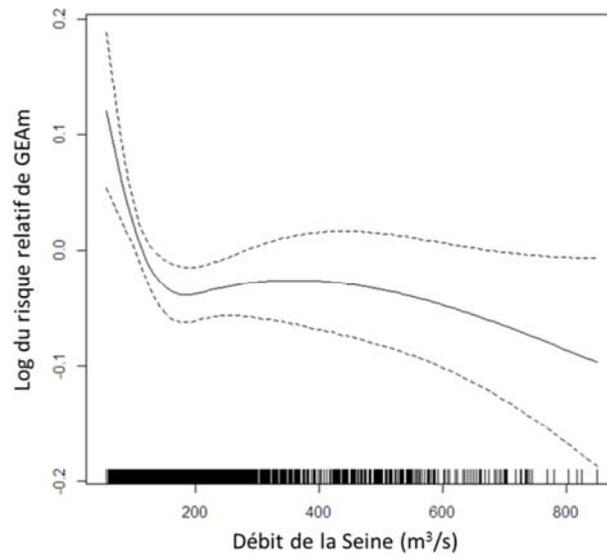
Variation du risque de GEAm chez les 16 ans et plus du secteur Sedif-sud en fonction de la température de l'eau traitée et du nombre de particules dans l'eau filtrée, modélisation multi-exposition (2002-2007)



La relation entre le débit de la Seine et l'incidence des GEAm est similaire à celle observée chez les enfants (figure 55). L'association est significative ($p=2,6.10^{-2}$). La diminution du débit, de 238 à 94 m³/s, entraîne une hausse de 6,7 % IC_{95 %} = [2,1 %–11,6 %] du risque de GEAm. L'association entre le débit produit et l'incidence des GEAm n'est pas significative ($p = 0,9$).

I Figure 55 I

Variation du risque de GEAm (log) chez les 16 ans et plus du secteur Sedif-sud en fonction du débit de la Seine mesuré à Choisy-le-Roi, modélisation multi-exposition (2002-2007)



7. Discussion : analyse des facteurs de risque de GEAm liés à l'eau du robinet

Les trois secteurs du Sedif étudiés dans ce rapport sont les 6^e, 7^e et 8^e sites étudiés dans le cadre de l'étude turbidité et gastro-entérites. Aussi, il n'apparaît pas utile de discuter une nouvelle fois de la méthode statistique utilisée ou de la qualité des données sanitaires, celles-ci étant inchangées par rapport aux précédents volets de l'étude [8;12].

La proximité des trois secteurs du Sedif et leur similarité sont une occasion unique de comparer les résultats obtenus sur chacun d'entre eux. En effet, les trois usines de production d'eau sont constituées de filières de traitement comparables (avec une filière parallèle utilisant une étape de nanofiltration à Méry-sur-Oise). Elles exploitent des ressources superficielles comparables par leurs niveaux de contamination moyens par les entérocoques (≈ 700 UFC/100 ml) et pratiquement comparables pour les coliformes fécaux ($\approx 1\,500$ UFC/100 ml pour l'Oise et la Seine et $\approx 3\,000$ UFC/100 ml pour la Marne). Ces trois usines ont le même maître d'ouvrage qui a délégué son service à un seul exploitant (Veolia Eau), ce qui assure l'homogénéité des données d'autocontrôle produites (mêmes paramètres surveillés, mêmes procédures de qualité) et légitime les comparaisons.

7.1. Le débit produit

Les relations entre le débit produit et l'incidence des GEAm sont cohérentes sur les trois secteurs étudiés. Une augmentation du débit produit est liée à une hausse significative du risque de GEAm chez les enfants et non significative chez les adultes (excepté sur le secteur sud). Ce résultat est cohérent avec la majorité des résultats déjà acquis sur cette variable [7;8;15]. Le sens de cette relation ne trouve vraisemblablement pas son explication dans une hausse du nombre de consommateurs d'eau du robinet (et donc de personnes exposées) qui n'influence que peu la quantité d'eau produite par les usines. La réduction du temps de traitement de l'eau, dans l'objectif d'augmenter la quantité d'eau produite, ou de possibles modifications du processus de traitement, comme par exemple la vitesse de filtration ou la réduction de la fréquence de lavage des filtres, pourraient être des facteurs d'explications partiels de la relation observée entre risque de GEAm et débit produit.

7.2. Les particules plutôt que la turbidité

Sur les secteurs Sedif-nord et Sedif-est, la turbidité de l'eau traitée ne prend que 3 modalités de valeurs, entre 0,03 et 0,05 NTU. Sur le secteur Sedif-sud, 80 % des données correspondent à la valeur de 0,03 NTU. Dans ces conditions, il était difficile d'estimer un risque avec cette variable.

Les relations obtenues entre la turbidité de l'eau filtrée, mesurée en sortie de filtre à sable, et le risque de GEAm ne permettent pas non plus d'apporter une meilleure appréciation du risque lié à la turbidité. Sur le secteur Sedif-nord, la relation est décroissante et contraire aux précédents résultats [8;14;15]. La particularité de ce site est l'existence d'une étape de nanofiltration dans l'une des deux filières de l'usine, mais qui se trouve être complétée par une filière « biologique » moins performante en termes d'élimination des particules, qui contribue à environ 30 % du débit total produit, et qui limite probablement la qualité microbiologique de l'eau mise en distribution. Sur les secteurs Sedif-est et

sud, les relations entre turbidité de l'eau filtrée et risque de GEAm sont partiellement croissantes et vont donc en partie dans le sens des résultats déjà acquis. Toutefois, ces branches croissantes sont ajustées sur 15 % et 10 % des données et sont donc peu robustes.

Le comptage des particules est une mesure alternative à la turbidité pour évaluer la présence de matières en suspension dans l'eau. La gamme de taille des particules prises en compte (1,5 à 15 µm) constitue une restriction par rapport à la turbidité qui porte à la fois sur les particules les plus petites (les virus et les colloïdes de taille inférieure au µm sont exclus) et sur les particules de taille supérieure à 15 µm *a priori* peu présentes dans l'eau filtrée. Cette gamme vise l'inclusion des protozoaires libres (5-15 µm) mais peut aussi inclure des bactéries libres (0,5 à 3 µm) et des bactéries agrégées.

Sur les secteurs du Sedif, le comptage des particules possède une meilleure résolution que la turbidité dans la gamme des valeurs médianes observées sur les eaux filtrées. Sur le secteur Sedif-est, les résultats ne sont pas concluants et la variable n'a pas été introduite dans le modèle multi-exposition final. Sur les secteurs Sedif-nord et Sedif-sud, cette variable s'est révélée plus utile que la turbidité pour caractériser le risque de GEAm lié à l'eau du robinet. Les relations observées montrent qu'une augmentation du nombre de particules est liée à une augmentation du risque de GEAm. Sur le secteur Sedif-nord, l'association est significative et la relation croissante entre le minimum et le percentile 75 (333 particules/ml). Sur le secteur Sedif-sud, l'étude de l'interaction entre les variables « particules dans l'eau filtrée » et « température de l'eau traitée » a montré que l'effet adverse des particules n'était significatif qu'au-delà de 10 °C et qu'il s'accroissait avec l'augmentation de la température. Les niveaux de risque apparaissent plus élevés chez les enfants que chez les adultes, ce qui va dans le sens de ce qui a déjà été observé lors de précédents résultats obtenus avec la turbidité [8;15].

7.3. Des interactions significatives mais difficilement interprétables

7.3.1. Rôle de la température de l'eau

Sur chaque secteur étudié, la température de l'eau traitée est une variable associée au risque de GEAm, en interaction avec une autre variable qui diffère selon le site : COT de l'eau filtrée sur le secteur du Sedif-nord (figure 16), débit de la ressource sur le secteur Sedif-est (figure 36), concentration en particules de l'eau filtrée sur le secteur Sedif-sud (figure 54). Ces résultats confirment l'intérêt d'ajouter cette variable au sein des modélisations visant à étudier de multiples facteurs de risque des GEAm lié à l'eau du robinet.

Les températures supérieures à 10 °C augmentent les risques mentionnés (COT, débit de la rivière et nombre de particules en suspension). Les associations entre les couples de facteurs (par exemple température et COT) et les GEAm sont dans les 3 cas très significatives. Dans les études similaires, le rôle de la température a déjà été mis en évidence mais avec des effets contradictoires. Sur le site de Boston (dont les températures saisonnières sont beaucoup plus contrastées que celles rencontrées en Ile-de-France), le risque apparaît plus élevé aux faibles températures [16]. Sur le site de Paris-Est, le risque est plus fort aux températures extrêmes [15]. Les températures froides non extrêmes favorisent la survie des micro-organismes [17] et les températures extrêmes diminuent les performances des étapes de désinfection dans les traitements opérés. L'ajustement des traitements est d'ailleurs systématiquement réalisé en tenant compte de la température de l'eau. La multiplicité de

ces effets contradictoires rend difficilement interprétable son rôle sur le risque de GEAm lié à l'eau du robinet.

7.3.2. Particules comptées dans l'eau traitée

À l'origine, les mesures de particules ont été mises en place par l'exploitant afin de surveiller la présence de parasites dans l'eau traitée. Néanmoins, elles englobent également le comptage des bactéries, des algues, des particules minérales, des particules organiques et des agrégats hétérogènes. La répartition saisonnière des charges en micro-organismes indicateurs de contamination fécale dans les eaux de la Seine montre que c'est durant les périodes froides, entre les mois de novembre et avril, que les plus fortes concentrations sont observées (résultats non montrés). À l'inverse, en période chaude et lorsque les risques de GEAm lié aux particules sont les plus forts, on observe des niveaux moyens de contamination fécale de l'eau brute plus faibles. Cette contradiction apparente entre le modèle épidémiologique et les observations microbiologiques peut s'expliquer d'une part par une corrélation fluctuante entre indicateurs bactériens de contamination fécale et agents pathogènes, les niveaux d'indicateurs de contamination fécale ne traduisant ainsi pas correctement les niveaux de risque d'infection. Ceci est d'autant plus vrai que les traitements mis en œuvre éliminent pratiquement le risque bactérien au robinet (hors accident). D'autre part, le renforcement de la désinfection en période froide peut également contribuer à réduire le risque lié aux particules durant ces périodes.

7.3.3. Débit de la ressource

Dans les résultats acquis au sein de ce volet de l'étude, les faibles débits des ressources apparaissent comme un facteur de risque des GEAm. Ces résultats sont reproduits sur les trois secteurs étudiés à la fois chez les enfants et chez les adultes. Sur le secteur Sedif-est, l'introduction d'une interaction entre le débit de la Marne et la température de l'eau montre que l'effet des étiages sur les GEAm est peu marqué aux faibles températures alors qu'il s'accroît fortement aux températures supérieures à 10 °C. Les caractéristiques urbaines ou périurbaines des trois secteurs étudiés garantissent la présence d'un nombre élevé de rejets ponctuels d'eaux usées tels que les déversoirs d'orage ou émissaires de stations d'épuration [18;19], touchant directement les cours d'eau en amont des prises d'eau de chaque usine. Durant les périodes de faibles débits, et indépendamment de la température de l'eau, la diminution de la dilution des rejets pourrait contribuer à dégrader la qualité microbiologique des cours d'eau et participer à l'augmentation du risque de GEAm.

7.3.4. Carbone organique total de l'eau brute

L'analyse de l'interaction entre COT de l'eau brute et température de l'eau montre que le risque de GEAm est maximum et constant aux faibles valeurs de COT et aux faibles valeurs de températures. La réduction du risque de GEAm ne devient significative que lorsque les deux paramètres sont simultanément élevés. Ce résultat est difficilement interprétable.

7.4. Niveau des risques observés

Les niveaux de risques relatifs observés pour un écart interquartile des variables d'intérêt ne sont pas négligeables. En prenant en considération le niveau de risque relatif maximum observé parmi les 3 variables d'exposition retenues dans le modèle multivarié (tableau 14), on estime l'excès de risque chez les enfants à 15 % $IC_{95\%} = [1\% - 20\%]$ sur le secteur du Sedif-nord lorsque le débit produit augmente du p25 au p75, contre 10 % $IC_{95\%} = [6\% - 15\%]$ sur le secteur du Sedif-est lorsque le débit de la rivière diminue du p75 au p25, à une température de l'eau de 14,0 °C, et 7 % $IC_{95\%} = [2\% - 12\%]$ sur le secteur du Sedif-sud lorsque le débit de la rivière diminue du p75 au p25. Ce calcul retient les variables pour lesquelles les résultats sont significatifs, robustes, observés sur d'autres sites et plausibles biologiquement. Ne sont pas pris en considération la température de l'eau (très significative et robuste mais peu interprétable) ni le COT (corrélation forte mais peu reproductible d'un site à l'autre et dont l'interprétation nous échappe aussi). Le fait de retenir le maximum des risques relatifs interquartiles observés parmi les 3 variables d'exposition pallie à la surévaluation possible du risque qu'aurait entraîné la sommation des 3 risques, due à d'éventuelles colinéarités entre les variables correspondantes. Les risques indiqués sont des estimations par défaut. Ils sont comparables à ceux qui sont observés dans les études de séries temporelles réalisées sur des installations comparables [8;15].

I Tableau 14 I

Risques relatifs de gastro-entérites aiguës pour les secteurs Nord, Est et Sud du Sedif en fonction d'une variation du nombre de particules de l'eau après filtration sur sable, du débit produit et du débit de la rivière, modélisation multi-exposition, 2002-2007

	Secteur Sedif-nord (Méry-sur-Oise)		Secteur Sedif-est (Neuilly-sur-Marne)		Secteur Sedif-sud (Choisy-le-Roi)	
Particules (nb/ml)	p25 = 147 ; p75 = 333		p25 = 52 ; p75 = 150		p25 = 25 ; p75 = 65	
Modèle	RR interquartile	IC_{95%}	RR interquartile	IC_{95%}	RR interquartile	IC_{95%}
1-15 ans	1,121	[1,075-1,170]	ns	ns	0,997⁽¹⁾	[0,972-1,023]
16 ans +	1,085	[1,043-1,129]	ns	ns	1,094⁽²⁾	[1,055-1,134]
					1,005⁽¹⁾	[0,978-1,032]
					1,053⁽²⁾	[1,014-1,093]
Débit usine (m³/j)	p25 = 1,7.10 ⁵ ; p75 = 2,2.10 ⁵		p25 = 3,2.10 ⁵ ; p75 = 3,6.10 ⁵		p25 = 3,4.10 ⁵ ; p75 = 4,0.10 ⁵	
Modèle	RR interquartile	IC_{95%}	RR interquartile	IC_{95%}	RR interquartile	IC_{95%}
1-15 ans	1,150	[1,098-1,204]	1,044	[1,027-1,061]	1,067	[1,045-1,088]
16 ans +	1,035	[0,994-1,079]	1,002	[0,988-1,016]	1,002	[0,984-1,020]
Débit rivière (m³/s)	p25 = 46 ; p75 = 122		p25 = 45 ; p75 = 110		p25 = 94 ; p75 = 238	
Modèle	RR interquartile	IC_{95%}	RR interquartile	IC_{95%}	RR interquartile	IC_{95%}
1-15 ans	0,920	[0,860-0,984]	0,964⁽¹⁾	[0,930-0,999]	0,936	[0,892-0,982]
			0,826⁽²⁾	[0,775-0,881]		
16 ans +	0,941	[0,884-1,002]	0,965⁽¹⁾	[0,932-0,998]	0,937	[0,896-0,980]
			0,909⁽²⁾	[0,854-0,968]		

ns = non significatif ; ⁽¹⁾ 9°C eau = p25 ; ⁽²⁾ 9°C eau = p75.

Il est cependant étonnant que le niveau le plus fort soit observé sur un site (Sedif nord) alimenté pour les deux tiers par une eau ultra-filtrée réputée exempte d'agents pathogènes. Le fait que la variable « part de la filière biologique dans le débit distribué » n'apparaisse pas comme un facteur de risque n'est cependant pas en faveur de l'hypothèse de la responsabilité de la filière « biologique ». Par ailleurs l'hypothèse d'une contamination secondaire au niveau du réseau est exclue car les modèles n'incluent pas de variables mesurées à l'aval de l'usine de traitement.

Aussi, bien que la contribution de l'eau au risque de GEAm paraisse très vraisemblable, la définition du niveau de risque attribuable à l'eau reste problématique et de nombreuses questions subsistent dans l'interprétation des associations. La spécificité des variables d'exploitation demeure ainsi insuffisante pour parvenir à des conclusions claires et à des préconisations de gestion.

8. Conclusion

Le nombre de particules comptées dans l'eau est apparu comme un meilleur *proxy* du risque de GEAm lié à l'eau distribué que la turbidité. Les modélisations réalisées avec cette variable en remplacement de la turbidité ont montré dans 2 sites sur 3 des relations de forme similaire sur le risque de GEAm. La mise à disposition d'une information en routine sur la distribution des tailles des particules détectées, associée à une caractérisation générale de ces particules par gamme de taille, pourrait aider à préciser les risques dans le cadre de prochaines études sur le sujet.

Sur l'ensemble des trois sites, l'effet de la température de l'eau est apparu comme déterminant pour mieux appréhender le rôle de l'eau distribuée sur le risque de GEAm. C'est en effet durant les périodes où l'eau est de température supérieure à 10 °C que les associations entre la dégradation de la qualité de l'eau et le risque de GEAm apparaissent les plus fortes. La forte urbanisation de la zone d'étude laisse supposer que la concentration des rejets d'eaux d'usées durant les périodes d'étiage, qui sont aussi les plus chaudes, produit un effet significatif sur la qualité de l'eau. Les résultats restent toutefois peu interprétables dans le détail. L'adaptation permanente du traitement par l'exploitant suivant des modalités qui n'ont pas été renseignées au jour le jour dans l'étude pourrait expliquer cette difficulté.

Les résultats de ces nouveaux travaux confirment que dans le cadre d'une filière de traitement utilisant une eau de rivière, le débit de la ressource influence significativement le risque de GEA lié à l'eau distribuée [8;15]. Le risque se trouve accentué soit en période d'étiage, soit en période de crue, soit durant ces deux périodes.

Références bibliographiques

- [1] Van Cauteren D, de Valk H, Vaux S, Le Strat Y, Vaillant V. Burden of acute gastroenteritis and healthcare-seeking behaviour in France: a population-based study. *Epidemiol Infect* 2012;140(4):697-705.
- [2] Bounoure F, Beaudreau P, Mouly D, Skiba M, Lahiani-Skiba M. Syndromic Surveillance of Acute Gastro-Enteritis Based on Drug Consumption, France. *Epidemiol Infect* 2011.
- [3] Zmirou D, Ferley JP, Collin JF, Charrel M, Berlin J. A follow-up study of gastro-intestinal diseases related to bacteriologically substandard drinking water. *Am J Public Health* 1987;77(5):582-4.
- [4] Payment P, Siemiatycki J, Richardson L, Renaud G, Franco E, Prevost M. A prospective epidemiological study of gastrointestinal health effects due to the consumption of drinking water. *International Journal of Environmental Health Research* 1997;7:5-31.
- [5] Sinclair MI, Fairley CK. Drinking water and endemic gastrointestinal illness. *J Epidemiol Community Health* 2000;54(10):728.
- [6] Hellard ME, Sinclair MI, Forbes AB, Fairley CK. A randomized, blinded, controlled trial investigating the gastrointestinal health effects of drinking water quality. *Environ Health Perspect* 2001;109(8):773-8.
- [7] Beaudreau P, Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M. Qualité de l'eau distribuée à Angoulême et incidence des gastro-entérites aiguës, 2007-2007. Saint-Maurice, France : Institut de veille sanitaire; 2013. 36 p.
- [8] Beaudreau P, Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M. Qualité de l'eau distribuée à Nantes et incidence des gastro-entérites aiguës. Saint-Maurice, France : Institut de veille sanitaire; 2012. 47 p.
- [9] Beaudreau P, Bounoure F, Genet M. Estimation de l'incidence des gastro-entérites aiguës à partir des bases de données de l'Assurance maladie [A method for assessing acute gastro-enteritis incidence from French health insurance databases]. *Pratiques et organisation des soins* 2006;37(4):313-23.
- [10] Bounoure F, Beaudreau P, Genet M. La surveillance des gastro-entérites aiguës grâce à l'utilisation des données de l'Assurance maladie, le Havre, France, 1999-2000.
- [11] Eilstein D, Larrieu S, Wagner V, Zeghnoun A. Association entre l'exposition à la pollution atmosphérique et la santé : utilisation des séries chronologiques. *J Soc Fra Stat* 2009;150(1)
- [12] Beaudreau P, Le Tertre A, Zeghnoun A. Qualité de l'eau distribuée en Ville basse du Havre et ventes des médicaments utilisés pour le traitement des gastro-entérites, 1997-2000 : une étude écologique temporelle. Saint-Maurice, France : Institut de veille sanitaire; 2010. 42 p.
- [13] Haas CN, Rose JB, Gerba CP. Quantitative microbial risk assessment. New York : John Wiley & Sons; 1999. 449 p.
- [14] Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M, Beaudreau P. Qualité de l'eau distribuée à Paris-Centre et incidence des gastro-entérites aiguës, 2002-2007. Saint-Maurice, France : Institut de veille sanitaire; 2013.
- [15] Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M, Beaudreau P. Qualité de l'eau distribuée à Paris-Est et incidence des gastro-entérites aiguës, 2002-2007. 2014.

- [16] Beaudeau P, Schwartz J, Levin R. Drinking Water Quality and Hospital Admissions of Elderly People for Gastrointestinal Illness in Eastern Massachusetts, 1998-2008. *Water Res* 2014;Submitted.
- [17] Barcina I, Lebaron P, Vives-rego J. Survival of allochthonous bacteria in aquatic systems : a biological approach. *FEMS Microbiology Ecology* 1997;(23):1-9.
- [18] Garcia-Armisen T, Servais P. Respective contributions of point and non-point sources of *E. coli* and enterococci in a large urbanized watershed (the Seine river, France). *J Environ Manage* 2007;82(4):512-8.
- [19] Servais P, Garcia-Armisen T, George I, Billen G. Fecal bacteria in the rivers of the Seine drainage network (France): sources, fate and modelling. *Sci Total Environ* 2007;375(1-3):152-67.

Annexes

Annexe 1 : caractéristiques des secteurs d'étude

Secteur	Sud (Choisy-le-Roi)		Secteur	Nord (Méry-sur-Oise)		Secteur	Est (Neuilly-sur-Marne)	
	<i>1-15 ans</i>	279 846		<i>1-15 ans</i>	144 986		<i>1-15 ans</i>	207 196
Population 2006	<i>16 ans et +</i>	1 234 459	Population 2006	<i>16 ans et +</i>	528 565	Population 2006	<i>16 ans et +</i>	746 605
	<i>total</i>	1 514 306		<i>total</i>	673 551		<i>total</i>	953 801
Code Insee	Commune		Code Insee	Commune		Code Insee	Commune	
78322	Jouy-en-Josas		78311	Houilles		93001	Aubervilliers	
78343	Loges-en-Josas (Les)		95014	Andilly		93006	Bagnole	
78640	Vélizy-Villacoublay		95018	Argenteuil		93008	Bobigny	
78686	Viroflay		95039	Auvers-sur-Oise		93010	Bondy	
91064	Bièvres		95051	Beauchamp		93013	Bourget (Le)	
91312	Igny		95060	Bessancourt		93014	Clichy-sous-Bois	
91377	Massy		95063	Bezons		93027	Courneuve (La)	
91477	Palaiseau		95176	Cormeilles-en-Parisis		93029	Drancy	
91645	Verrières-le-Buisson		95197	Deuil-la-Barre		93030	Dugny	
91689	Wissous		95199	Domont		93032	Gagny	
92002	Antony		95203	Eaubonne		93033	Gournay-sur-Marne	
92007	Bagneux		95205	Écouen		93045	Lilas(Les)	
92012	Boulogne-Billancourt		95210	Enghien-les-Bains		93046	Livry-Gargan	
92014	Bourg-la-Reine		95219	Ermont		93047	Montfermeil	
92019	Châtenay-Malabry		95252	Franconville		93048	Montreuil	
92020	Châtillon		95257	Frette-sur-Seine(La)		93049	Neuilly-Plaisance	
92022	Chaville		95288	Groslay		93050	Neuilly-sur-Marne	
92023	Clamart		95306	Herblay		93053	Noisy-le-Sec	
92032	Fontenay-aux-Roses		95369	Margency		93057	Pavillons-sous-Bois (Les)	
92040	Issy-les-Moulineaux		95394	Méry-sur-Oise		93061	Pré-Saint-Gervais (Le)	
92046	Malakoff		95424	Montigny-les-Cormeilles		93062	Raincy (Le)	
92048	Meudon		95426	Montlignon		93063	Romainville	
92049	Montrouge		95427	Montmagny		93064	Rosny-sous-Bois	
92060	Plessis-Robinson (Le)		95428	Montmorency		93066	Saint-Denis	
92062	Puteaux		95488	Pierrelaye		93072	Stains	
92071	Sceaux		95489	Piscop		93077	Villemomble	
92072	Sèvres		95491	Plessis-Bouchard(Le)				
92075	Vanves		95539	Saint-Brice-sous-Forêt				
94002	Alfortville		95555	Saint-Gratien				
94003	Arcueil		95563	Saint-Leu-la-Forêt				
94016	Cachan		95574	Saint-Prix				
94018	Charenton-le-Pont		95582	Sannois				
94021	Chevilly-Larue		95585	Sarcelles				
94022	Choisy-le-Roi		95598	Soisy-sous-Montmorency				
94033	Fontenay-sous-Bois		95607	Taverny				
94034	Fresnes		95680	Villiers-le-Bel				
94037	Gentilly							
94038	Hay-les-Roses(L')							
94041	Ivry-sur-Seine							
94043	Kremlin-Bicêtre(Le)							
94046	Maisons-Alfort							
94067	Saint-Mandé							
94069	Saint-Maurice							
94073	Thiais							
94076	Villejuif							
94080	Vincennes							
94081	Vitry-sur-Seine							

Annexe 2 : script R et paramètres du modèle multi-exposition utilisé sur le secteur Sedif-nord chez les moins de 16 ans

Family: quasipoisson

Link function: log

Formula:

```
spell15 ~ s(trend, k = 100, bs = "cr", fx = FALSE) + dowf + j.feries
+ ete + fevrier + noel + paques + toussaint + Q.sor.Me.Moy68
+ te(COT.EB.Moy68, T.eau.Moy68)
+ s(Part.EF.Moy68, bs = "cr", fx = TRUE, k = 4)
+ s(Q.Oise.Moy68, bs = "cr", fx = TRUE, k = 4)
```

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.237e+00	1.055e-01	11.728	< 2e-16 ***
dowfjeudi	2.082e+00	4.100e-02	50.781	< 2e-16 ***
dowflundi	2.354e+00	4.023e-02	58.521	< 2e-16 ***
dowfmardi	2.079e+00	4.071e-02	51.070	< 2e-16 ***
dowfmercredi	1.889e+00	4.141e-02	45.612	< 2e-16 ***
dowfsamedi	1.403e+00	4.306e-02	32.583	< 2e-16 ***
dowfvendredi	2.022e+00	4.109e-02	49.200	< 2e-16 ***
j.feries1	-1.984e+00	9.317e-02	-21.298	< 2e-16 ***
ete1	-2.490e-01	3.611e-02	-6.897	7.69e-12 ***
fevrier1	-5.330e-01	6.233e-02	-8.552	< 2e-16 ***
noel1	-2.894e-01	3.479e-02	-8.319	< 2e-16 ***
paques1	-4.178e-01	4.014e-02	-10.409	< 2e-16 ***
toussaint1	-4.695e-01	4.994e-02	-9.400	< 2e-16 ***
Q.sor.Me.Moy68	2.946e-06	4.947e-07	5.956	3.19e-09 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(trend)	38.421	47.482	23.145	< 2e-16 ***
te(COT.EB.Moy68,T.eau.Moy68)	5.287	6.573	4.182	0.000229 ***
s(Part.EF.Moy68)	3.000	3.000	12.074	8.16e-08 ***
s(Q.Oise.Moy68)	3.000	3.000	14.018	5.08e-09 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.901 **Deviance explained** = 90.7 %

GCV = 2.1838 **Scale est.** = 2.1112 **n** = 1640

Annexe 3 : script R et paramètres du modèle multi-exposition utilisé sur le secteur Sedif-est chez les moins de 16 ans

Family: quasipoisson

Link function: log

Formula:

```
spell15 ~ s(trend, k = 100, bs = "cr", fx = FALSE) + dowf + j.feries
+ ete + fevrier + noel + paques + toussaint + Q.sor.Ne.Moy68
+ te(T.eau.Moy68, Q.Marne.Moy68)
```

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.972e+00	6.674e-02	29.551	< 2e-16 ***
dowfjeudi	2.068e+00	3.531e-02	58.554	< 2e-16 ***
dowflundi	2.337e+00	3.488e-02	67.006	< 2e-16 ***
dowfmardi	2.051e+00	3.531e-02	58.083	< 2e-16 ***
dowfmercredi	1.887e+00	3.567e-02	52.887	< 2e-16 ***
dowfsamedi	1.378e+00	3.719e-02	37.065	< 2e-16 ***
dowfvendredi	1.981e+00	3.546e-02	55.861	< 2e-16 ***
j.feries1	-1.936e+00	7.717e-02	-25.090	< 2e-16 ***
ete1	-3.059e-01	3.165e-02	-9.663	< 2e-16 ***
fevrier1	-4.273e-01	3.329e-02	-12.835	< 2e-16 ***
noel1	-3.864e-01	2.912e-02	-13.270	< 2e-16 ***
paques1	-3.275e-01	3.517e-02	-9.312	< 2e-16 ***
toussaint1	-4.048e-01	4.610e-02	-8.779	< 2e-16 ***
Q.sor.Ne.Moy68	8.755e-07	1.656e-07	5.287	1.39e-07 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(trend)	41.85	51.617	31.660	< 2e-16 ***
te(T.eau.Moy68,Q.Marne.Moy68)	5.51	6.501	8.341	2.32e-09 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.9 Deviance explained = 90.7 %
GCV = 2.8494 Scale est. = 2.75 n = 1940

Annexe 4 : script R et paramètres du modèle multi-exposition (avec turbidité) utilisé sur le secteur Sedif-sud chez les moins de 16 ans

Family: quasipoisson

Link function: log

Formula:

```
spell15 ~ s(trend, k = 100, bs = "cr", fx = FALSE) + dowf + j.feries +  
ete + fevrier + noel + paques + toussaint + Q.sor.Ch.Moy68  
+ te(T.eau.Moy68, Part.EF.Moy68)  
+ s(Q.Seine.Moy68, bs = "cr",fx = TRUE, k = 4)
```

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.837e+00	7.722e-02	23.791	< 2e-16 ***
dowfjeudi	1.869e+00	3.394e-02	55.083	< 2e-16 ***
dowflundi	2.177e+00	3.330e-02	65.368	< 2e-16 ***
dowfmardi	1.868e+00	3.386e-02	55.175	< 2e-16 ***
dowfmercredi	1.708e+00	3.432e-02	49.763	< 2e-16 ***
dowfsamedi	1.213e+00	3.583e-02	33.848	< 2e-16 ***
dowfvendredi	1.823e+00	3.393e-02	53.737	< 2e-16 ***
j.feries1	-1.800e+00	7.586e-02	-23.728	< 2e-16 ***
ete1	-3.491e-01	3.702e-02	-9.428	< 2e-16 ***
fevrier1	-5.470e-01	3.404e-02	-16.068	< 2e-16 ***
noell1	-5.367e-01	2.995e-02	-17.917	< 2e-16 ***
paques1	-4.226e-01	3.898e-02	-10.840	< 2e-16 ***
toussaint1	-5.368e-01	4.661e-02	-11.517	< 2e-16 ***
Q.sor.Ch.Moy68	1.159e-06	1.849e-07	6.267	4.59e-10 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(trend)	42.883	52.850	34.414	< 2e-16 ***
te(T.eau.Moy68,Part.EF.Moy68)	4.748	5.898	9.767	2.18e-10 ***
s(Q.Seine.Moy68)	3.000	3.000	2.600	0.0507 .

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.924 **Deviance explained** = 92.1 %
GCV = 2.5476 **Scale est.** = 2.4566 **n** = 1877

Qualité de l'eau distribuée en banlieue parisienne et incidence des gastro-entérites aiguës

2002-2007

L'étude turbidité et gastro-entérites vise à établir et caractériser le lien entre le niveau de turbidité d'une eau distribuée et le nombre de cas de gastro-entérites aiguës médicalisées (GEAm) observés sur la zone desservie. Ce volet de l'étude concerne trois secteurs géographiques de la banlieue parisienne incluant 109 communes franciliennes et plus de 3 millions de personnes. Les trois usines de Méry-sur-Oise (95), Neuilly-sur-Marne (93) et Choisy-le-Roi (94) sont respectivement alimentées par les eaux de l'Oise, de la Marne et de la Seine. Ces eaux brutes superficielles sont traitées par des étapes classiques de clarification, décantation, filtration et désinfection dans les trois usines, exceptées à Méry-sur-Oise où il existe en sus une étape de nanofiltration.

L'incidence des GEAm était obtenue à partir des données de l'Assurance maladie sur la période 2002 à 2007. La méthode consistait à régresser, par un modèle additif généralisé, l'incidence des GEAm sur les niveaux quotidiens de turbidité de l'eau, puis dans une seconde étape, sur plusieurs autres paramètres d'exploitation des usines afin de rechercher les facteurs de risque des GEAm.

Les résultats ne montrent pas de relation convaincante entre les niveaux de turbidité et le risque de GEAm. Le comptage des particules s'est révélé plus utile pour caractériser le risque de gastro-entérites lié à l'eau du robinet sur deux des trois secteurs étudiés. Les niveaux de risque sont toutefois très variables d'un secteur à l'autre.

L'effet de la température de l'eau est apparu déterminant pour mieux appréhender le rôle de l'eau distribuée sur le risque de GEAm, avec des relations plus marquées aux fortes températures. Les résultats de ces travaux confirment que les périodes d'étiage ou de crue sont celles où le risque de GEAm est le plus fort pour les usines utilisant une eau de rivière.

Mots clés : eau, gastro-entérites, Assurance maladie, séries temporelles, Ile-de-France, Sédif

Quality of water distributed in Paris Suburbs and incidence of acute gastroenteritis

2002-2007

The turbidity and gastroenteritis study aims to establish and characterize the link between produced water turbidity and the incidence of acute gastroenteritis (AGE) in many French areas. This report concern 3 districts of the suburbs of Paris including more than 3 million peoples. The three water supply plants of Mery-sur-Oise, Neuilly-sur-Marne and Choisy-le-Roi respectively pumped their water from the Oise, Marne and Seine Rivers. The treatment chain include classical operations of clarification, settling, filtration and disinfection.

The incidence of AGE was obtained from the 2002-2007 French national health insurance data. In a first step, the method, based on a generalized additive model, consisted in regressing the daily incidence of AGE on the daily levels of produced water turbidity. In a second step, several operating condition parameters of the plant were tested as risk factors for AGE.

The results do not show a relation between turbidity degradation and risk of AGE. Particles counts appear to be a best predictor of the risk of AGE on two of the three districts. Risk levels were different between the 3 districts.

Water temperature appears as a determinant factor to better characterize the role of water in the incidence of AGE. Results show that low-flow or flood periods were the most at risk of AGE for water treatment plants which use water from a river.

Citation suggérée :

Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M, Beaudou P. Qualité de l'eau distribuée en banlieue parisienne et incidence des gastro-entérites aiguës, 2002-2007. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire ; 2015. 84 p. Disponible à partir de l'URL : <http://www.invs.sante.fr>