

*Santé environnement*

# Qualité de l'eau distribuée à Paris-Est et incidence des gastro-entérites aiguës (GEA)

2002-2007

Loïc Rambaud, Abdelkrim Zeghnoun,  
Magali Corso, Pascal Beaudeau

## Sommaire

Abréviations	2
<b>1. Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2. Objectifs de l'étude</b>	<b>4</b>
<b>3. Matériel et méthodes</b>	<b>5</b>
3.1 Production de l'eau à l'usine de Joinville	5
3.2 Production de l'eau à l'usine d'Ivry	6
3.3 Données et variables	7
3.3.1 Données environnementales	8
3.3.2 Données sanitaires	9
3.4 Le modèle statistique	10
3.5 Étude du rôle de la turbidité	11
3.5.1 Définition du <i>proxy</i> d'exposition utilisé	11
3.5.2 Latence et décalage de l'exposition	11
3.6 Recherche d'autres facteurs de risque	12
3.6.1 Analyses mono-exposition	12
3.6.2 Analyses multi-exposition	13
<b>4. Résultats</b>	<b>14</b>
4.1 Qualité des données	14
4.2 Distribution des variables	15
4.2.1 Indicateurs sanitaires	15
4.2.2 Températures	15
4.2.3 Eau brute	16
4.2.4 Eaux produites	19
4.3 Relation entre la turbidité de l'eau produite et l'incidence des GEA	21
4.4 Recherche d'autres facteurs de risque	23
4.4.1 Relation entre l'incidence des GEAm et la turbidité de l'eau produite	25
4.4.2 Relation entre l'incidence des GEAm et la turbidité de l'eau brute	28
4.4.3 Relation entre l'incidence des GEAm et les débits produits	30
4.4.4 Relation entre l'incidence des GEAm et les débits des ressources	32
4.4.5 Relation entre l'incidence des GEAm et la température du mélange d'eaux produites	35
4.5 Modélisation multi-exposition	35
4.5.1 Construction du modèle multi-exposition	35
4.5.2 Modélisation chez les enfants	36
4.5.3 Validation du modèle chez les adultes	41
<b>5. Discussion</b>	<b>43</b>
<b>6. Conclusion</b>	<b>44</b>
Références bibliographiques	45
Annexe	46

# Qualité de l'eau distribuée à Paris-Est et incidence des gastro-entérites aiguës (GEA)

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 (Véolia 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 Thiebert (Syndicat des eaux d'Ile-de-France), Olivier Thomas (École des hautes études en santé publique, EHESP), Daniel Vilessot (Lyonnaise des eaux), 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, la Société anonyme de gestion des eaux de Paris (Sagep) pour la fourniture des données d'exploitation et Météo-France pour la fourniture des données météorologiques. Ils remercient également Clément Bassi de la Cire Ile-de-France/Champagne-Ardenne pour la relecture de ce rapport.

## Abréviations

CTU	Classe thérapeutique utilisée
Erasme	Extraction, recherche et analyses pour un suivi medio-économique
GAM	Generalized Additive Model
GEA	Gastro-entérite aiguë
GEAm	Gastro-entérite aiguë médicalisée
IC	Intervalle de confiance
Insee	Institut national de la statistique et des études économiques
MES	Matières en suspension
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
NFU	Nephelometric Formazine Unit
Sagep	Société anonyme de gestion des eaux de Paris
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<sup>e</sup> siècle. Même si leur recensement n'atteint pas l'exhaustivité, leur nombre est aujourd'hui probablement faible. 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 ou 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 ou dégradations brutales de la qualité de l'eau mais ne permettent pas d'apprécier correctement les niveaux de risque infectieux qui peuvent subsister après les opérations de traitement, surtout s'ils sont faibles. De plus, l'absence de ces indicateurs dans les eaux destinées à la consommation humaine ne permet pas d'exclure une contamination microbiologique de l'eau, notamment par des virus ou protozoaires, qui participent au bruit de fond de gastro-entérites aiguës (GEA) d'origine hydrique.

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. La plupart des filières de traitement de l'eau n'ont cependant pas les capacités techniques de produire une eau totalement exempte de microorganismes pathogènes. Les matières en suspension (MES), si elles ne sont intégralement 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 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 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;3].

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 [4]. 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 [5] tandis que d'autres auteurs contestaient la validité des méthodes et avançaient des risques très inférieurs [6]. Les études temporelles ne sont pas disponibles en nombre suffisant pour permettre de quantifier le risque endémique attribuable à la consommation d'eau.

L'étude Turbidité & 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 médicalisées) et une ou plusieurs variables d'exposition (données de qualité de l'eau, données météorologique ou autres). Cette étude vise ainsi à valider et 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. 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 limitée pour les contaminations virales ou parasitaires.

Après avoir traité les sites de production d'eau du Havre [7], de Nantes [8], d'Angoulême [9] et de Paris-Centre [10], le volet actuel de l'étude se focalise sur les quartiers de l'est parisien. Sur la période de recueil des données nécessaires à l'étude, entre 2002 et 2007, la ville de Paris avait délégué la production et la distribution de l'eau potable à la Société anonyme de gestion des eaux de Paris (Sagep). La diversité des ressources utilisées permet de sécuriser l'approvisionnement en eau de la capitale. L'eau provient ainsi de multiples ressources souterraines réparties dans un rayon de 150 km autour de Paris, ou directement de l'exploitation de la Seine et de la Marne (cas de la présente étude).

## 2. Objectifs de l'étude

L'étude Turbidité & Gastro-entérites est une étude multicentrique incluant onze villes ou agglomérations françaises. Le présent volet de cette étude se focalise sur la distribution d'eau dans deux arrondissements de l'est de la capitale.

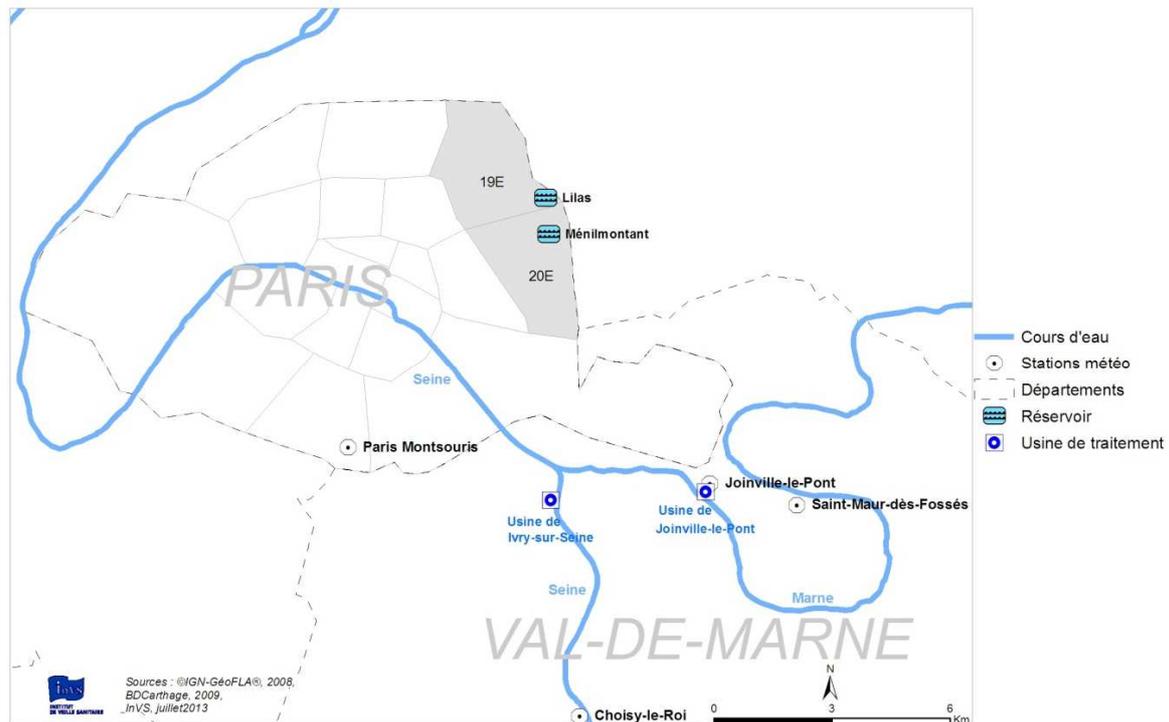
Ce volet local de l'étude répond à plusieurs objectifs :

- étudier la relation entre la turbidité de l'eau mise en distribution dans le secteur Paris-Est et le nombre de cas de GEA médicalisés observés sur les arrondissements cibles ;
- explorer 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 GEA ;
  - construire un modèle multi-exposition (contenant plusieurs *proxy* d'expositions) plausible à partir des données d'exploitation disponibles.

### 3. Matériels et méthodes

La zone d'étude du secteur Paris-Est correspond aux 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> arrondissements de Paris. Au recensement 2006, la population de ces 2 arrondissements était de plus de 379 000 habitants, dont 67 700 de moins de 15 ans, soit 17,8 % contre 18,3 % dans la population française métropolitaine. Sur la période allant de 2002 à 2007, ces deux arrondissements ont été exclusivement alimentés par les eaux superficielles de la Marne et de la Seine, respectivement traitées dans les usines de Joinville-le-Pont et d'Ivry-sur-Seine (figure 1).

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.



#### 3.1 Production de l'eau à l'usine de Joinville

La première usine de production d'eau potable de Joinville-le-Pont fut construite en 1896 pour les besoins d'alimentation des quartiers de l'est parisien. Après de multiples travaux visant à moderniser l'usine et à y intégrer les nouvelles technologies, l'usine a été totalement rénovée en 1993. Aujourd'hui, sa capacité de production a été portée à 300 000 m<sup>3</sup>/j. L'usine met en œuvre une filière biologique lente reproduisant en 12 heures le processus naturel de filtration de l'eau dans le sol.

L'eau brute est pompée dans la Marne. Après un prétraitement consistant en un dégrillage, l'eau subit une clarification dont les étapes sont modulables en fonction de la qualité de l'eau de la Marne, qui varie de manière saisonnière (algues, turbidité, etc.).

Les étapes obligatoires consistent en :

- un dégrossissage de l'eau sur biolite (taille de 2,7 mm, hauteur de couche de 1,10 m et vitesse moyenne de l'eau de 10 m/h) ;
- une préfiltration sur sable (diamètre de 0,95 mm, hauteur de couche de 1,10 m et vitesse de filtration de 8 m/h) ;
- une filtration biologique lente sur sable (diamètre de 0,6 mm, hauteur de 0,80 m et vitesse de filtration de 0,2 à 0,5 m/h).

Les étapes complémentaires de clarification sont mises en œuvre au besoin :

- une pré-ozonation, si la température de l'eau brute dépasse les 15 °C ;
- une flottation, prévue être mise en œuvre lorsque la teneur en algues de l'eau brute dépasse les 20 000 unités/ml ;
- une décantation, prévue pour être mise en œuvre lorsque la turbidité de l'eau brute dépasse les 50 unités néphélométrique de turbidité (NTU). Elle est réalisée grâce à un ajout de chlorure ferrique à des concentrations comprises entre 10 et 50 mg/m<sup>3</sup>.

Les périodes exactes de fonctionnement de la flottation et de la décantation ont été fournies par l'exploitant.

L'eau subit ensuite une désinfection par ozonation avec un temps de contact de 4 minutes et un objectif de résiduel d'ozone fixé à 0,4 mg/l. L'eau est ensuite affinée sur des filtres à charbon actif en grains, dont la hauteur de la couche est de 2,20 m et le temps de contact d'un minimum de 8 mn.

Enfin, l'eau subit une étape de désinfection par chloration *via* adjonction d'hypochlorite de sodium avec l'objectif d'un résiduel de 0,5 mg/l après 30 minutes de contact dans un réservoir de stockage de 5 000 m<sup>3</sup> situé sur le site de l'usine. Après cette ultime étape, l'eau est envoyée par deux aqueducs souterrains (refoulement nord et sud) jusqu'aux réservoirs parisiens de Ménilmontant (95 000 m<sup>3</sup>) et des Lilas (208 000 m<sup>3</sup>) où elle arrive en quelques heures.

## 3.2 Production de l'eau à l'usine d'Ivry

L'usine d'Ivry a été créée en 1900 pour l'exposition universelle parisienne. Elle a été totalement rénovée entre 1988 et 1993 et sa capacité de production est de 300 000 m<sup>3</sup>/j. Cette usine pompe l'eau de la Seine mais peut également recevoir des eaux brutes de l'aqueduc de la Dhuis ou de la Marne (envoyée par l'usine de Joinville) en cas de pollution majeure de la Seine.

La filière mise en œuvre est similaire à celle existante à Joinville, à l'exception des étapes de flottation et de décantation qui n'existent pas à Ivry.

L'eau pompée subit tout d'abord un dégrillage puis est orientée vers les étapes de clarification qui comprennent, dans l'ordre :

- une pré-ozonation en période estivale ou si la température de l'eau dépasse les 15 °C ;
- un dégrossissage sur biolite (de taille de 2,7 mm) à la vitesse de 10 m/h avec ajout de chlorure ferrique (5 g/m<sup>3</sup>) permettant une coagulation sur filtre ;

- une préfiltration sur sable (diamètre de 0,90 mm, hauteur de couche de 1 m et vitesse de filtration de 8 m/h) ;
- une filtration biologique lente sur sable (diamètre de 0,6 mm, hauteur de couche de 0,6 m et vitesse de 0,2 à 0,6 m/h).

L'eau est ensuite affinée par une post-ozonation avec un temps de contact de 4 mn avec pour objectif un résiduel d'ozone de 0,4 mg/l. L'eau subit ensuite une filtration sur charbon actif en grain sur une période minimale de 6 mn (hauteur de couche de 1 m et vitesse maximale de 10 m/h).

Enfin, l'eau est désinfectée par adjonction d'hypochlorite de soude avec l'objectif d'un résiduel minimal de chlore de 0,5 mg/l après 30 minutes de contact.

Après ces étapes de traitement, d'une durée moyenne de 12 heures, l'eau est envoyée par refoulement dans les réservoirs de Ménilmontant et des Lilas.

### 3.3 Données et variables

Les variables utilisées couvrent la période allant du 1<sup>er</sup> janvier 2002 au 30 juin 2007. Plusieurs variables d'environnement ont été construites pour évaluer l'exposition (tableau 1).

**Tableau 1 : Intitulé des variables utilisées.**

Intitulé	Unité	Libellé
spe115	nombre/jour	Nombre de cas de gastro-entérites médicalisés chez les 1-15 ans
spe16p		Nombre de cas de gastro-entérites médicalisés chez les 16 ans et plus
p.Jo.1	mm/jour	Précipitations à Joinville-le-Pont
p.Jo.2		Précipitations à Saint-Maur-des-Fossés
p.lv.1		Précipitations à Paris (Montsouris)
p.lv.2		Précipitations à Choisy-le-Roi
t.a.moy	°C	Température minimum de l'air sous abri (station Paris-Montsouris)
t.eb.moy.Jo		Température moyenne de l'eau de la Marne à Joinville
t.eb.moy.lv		Température moyenne de l'eau de la Seine à Ivry
tuEB.moy.Jo	NTU	Turbidité moyenne de l'eau de la Marne à Joinville
tuEB.moy.lv		Turbidité moyenne de l'eau de la Seine à Ivry
QXTuET.moy	NFU	Turbidité moyenne des eaux produites pondérée par les débits
tuET.moy.Jo		Turbidité moyenne de l'eau produite à Joinville
tuET.moy.lv		Turbidité moyenne de l'eau produite à Ivry
QXCl.min	mg/l	Chlore minimum pondéré par les débits produits
Cl.min.Jo		Chlore libre minimum en sortie de l'usine de Joinville
Cl.min.lv		Chlore libre minimum en sortie de l'usine d'Ivry
Q.Marne	m <sup>3</sup> /s	Débit de la Marne à Joinville
Q.Seine		Débit de la Seine à Ivry
Q.sor	m <sup>3</sup> /jour	Débit total produit par les usines de Joinville et Ivry
Q.sor.Jo		Débit produit par l'usine de Joinville
Q.sor.lv		Débit produit par l'usine d'Ivry
Clarif.	type/jour	Type de clarification mise en œuvre (sans (0), décantation (1), flottation (2))

### **3.3.1 Données environnementales**

Les données de température de l'air et de précipitations ont été fournies par Météo-France. L'ensemble des autres données environnementales ont été fournies par Eaux de Paris.

#### **3.3.1.1 Turbidité des eaux brutes et produites**

Les valeurs moyennes et maximums de turbidité des eaux brutes et produites 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 & Gastro-entérites. Ces valeurs étaient obtenues à partir de mesures réalisées en continu, validées et archivées par l'exploitant sur un pas de temps de 15 minutes.

Pour l'usine de Joinville, qui dispose de deux aqueducs de refoulement de l'eau produite, seules les mesures réalisées sur l'aqueduc nord ont été prises en compte, du fait d'une meilleure disponibilité des données.

Une variable turbidité moyenne de l'eau produite a été créée en pondérant les turbidités quotidiennes des eaux des usines de Joinville et d'Ivry par les débits produits respectifs. Du fait du caractère quasi-conservatif de la turbidité pour des eaux traitées, cette variable peut être considérée comme un bon estimateur du niveau de turbidité de l'eau mise en distribution après passage par les réservoirs de Ménilmontant et des Lilas.

Les mesures de turbidité des eaux produites ont été exprimées en NTU jusqu'à fin 2003, puis en unité néphélométrique de formazine (NFU) par la suite. Une étude de l'exploitant permet de conclure à l'équivalence entre NTU et NFU dès lors que les niveaux de turbidité n'excèdent pas 0,2 NTU [11], ce qui est le cas pour les eaux produites sur l'ensemble de l'année 2003. Une analyse de corrélation des deux mesures lorsque celles-ci étaient disponibles permet de conclure à l'équivalence des deux unités ( $r^2=0,891$ ). L'ensemble des chroniques de mesure de turbidité des eaux produites ont été exprimées en NFU.

La turbidité des eaux brutes a été mesurée en NTU sur l'ensemble de la période d'étude.

#### **3.3.1.2 Débits des ressources**

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

#### **3.3.1.3 Débits produits**

Les débits produits ont été mesurés à la sortie des usines. Pour l'usine de Joinville, le débit total produit correspond à la somme des débits mesurés sur les aqueducs de refoulements nord et sud.

Les valeurs de débits produits correspondent aux quantités d'eaux acheminées jusqu'aux réservoirs de Ménilmontant et des Lilas et ne permettent pas d'évaluer directement la quantité d'eau consommée chaque jour par les habitants de la zone d'étude du fait de l'effet tampon du réservoir et d'une zone desservie plus vaste que la zone d'étude.

#### 3.3.1.4 Concentration minimale en chlore libre

Les mesures de chlore libre sur les eaux produites étaient fournies sur un pas de temps quotidien. Ces valeurs ont été construites à partir de mesures réalisées en continu mais archivées avec un pas de temps 15 minutes de manière automatique. Seul le minimum quotidien a été retenu dans cette étude.

#### 3.3.1.5 Températures et précipitations

Les variables températures et précipitations étaient fournies sur un pas de temps quotidien pour l'ensemble de la période d'étude.

La température moyenne de l'air a été construite à partir des mesures réalisées à la station météorologique située à Paris-Montsouris. La moyenne quotidienne était construite à partir des minima et maxima quotidiens.

Les températures de l'eau de la Marne et de la Seine étaient mesurées aux points de captages respectifs par la Sagep et étaient fournies sous la forme d'une moyenne quotidienne.

Les stations météorologiques situées à proximité des points de captages ont été choisies pour la récupération des données de précipitations. Ainsi, les stations de Joinville-le-Pont et de Saint-Maur-des-Fossés ont été utilisées pour l'usine de Joinville-le-Pont et les stations de Paris-Montsouris et Choisy-le-Roi pour l'usine d'Ivry-sur-Seine.

#### 3.3.1.6 Indicateurs de contamination microbiologiques

Les prélèvements quotidiens pour analyse microbiologique des eaux brutes ont été réalisés à l'arrivée des eaux dans les deux usines. Étaient analysés les coliformes totaux, coliformes fécaux, entérocoques, bactéries aérobies revivifiables à 37 °C et les spores de *Clostridium*. Aucun prélèvement ou analyse 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 pas été utilisées.

### 3.3.2 Données sanitaires

Deux indicateurs de santé ont été produits à partir des données de remboursements de médicaments extraites de la base Erasme (Extraction, recherche et analyses pour un suivi médico-économique) et fournies par l'Assurance maladie [12]. L'indicateur spe115 estime le nombre quotidien de cas de gastro-entérites aiguës médicalisés (GEAm) chez les enfants âgés de 1 à 15 ans inclus. Il a été utilisé pour la construction du modèle. L'indicateur spe16p comprend les cas adultes âgés de 16 ans et plus. Il a été utilisé pour la validation 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 GEA 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 [3]. 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 [12]. Celle-ci est restreinte aux ordonnances contenant un antiseptique intestinal ou un antiémétique. Elle présente un taux d'incidence national moyen (49 cas pour 1 000 habitants par an sur le secteur d'étude) et une saisonnalité similaires à celle des indicateurs fournis par le réseau des médecins sentinelles.

### 3.4 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...) 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'air [13]. 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. L'introduction d'un terme autorégressif a été nécessaire afin d'éviter de surajuster le modèle. Les variables d'exposition étaient ensuite introduites dans le modèle ajusté. Les paramètres du modèle final, intégrant les variables d'exposition retenues, sont présentés en annexe.

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 [13].

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. L'équation du modèle est du type :

$$Y_t \sim P(\mu_t) \quad \text{et} \quad \mu_t = E[Y_t]$$
$$\ln(\mu_t)_t = \sum_{j=1}^k \beta_j z_{tj} + \sum_{j=1}^p f_j(x_{tj})$$

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

## 3.5 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 produites dans l'apparition des GEAm sur la zone d'étude. Le modèle statistique a donc d'abord été construit en intégrant uniquement cette variable d'exposition en plus des variables de contrôle.

### 3.5.1 Définition du *proxy* d'exposition utilisé

La moyenne quotidienne de la turbidité de l'eau produite a été choisie comme *proxy* de l'exposition. Elle reflète une exposition moyennée sur une journée et l'expérience montre qu'elle est mieux corrélée que le maximum horaire à l'incidence des GEAm.

À partir des données disponibles, la moyenne pondérée des turbidités des eaux produites à Joinville et Ivry a été choisie *a priori* comme *proxy* dans le test de la turbidité car il est supposé refléter l'exposition conjointe aux agents pathogènes des 2 usines. Dans une seconde étape exploratoire, les turbidités quotidiennes moyennes des eaux produites à Joinville et Ivry ont été testées séparément.

### 3.5.2 Latence et décalage de l'exposition

Le décalage de temps entre la mesure de turbidité de l'eau produite, réalisée en sortie d'usine, et la consommation de l'eau (moment de l'exposition) a été estimé à 1 jour à partir des informations fournies par l'exploitant.

Tous agents pathogènes confondus, la période d'incubation moyenne de l'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 [14]. Les résultats obtenus dans les précédents volets de l'étude Turbidité & 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 mise en distribution 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 *lag* 7 (moyennes des valeurs quotidiennes des *lags* 6 à 8).

## 3.6 Recherche d'autres facteurs de risque

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

### 3.6.1 Analyses mono-exposition

#### 3.6.1.1 Analyses lags par lags

Les covariables d'exposition ont été introduites à tour de rôle dans le modèle statistique incluant les variables de contrôle (cf. § 3.4). Les tests portaient sur l'association entre le nombre de cas de GEAm au jour  $j$  et les covariables d'exposition sur les 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), excepté pour la concentration minimale en chlore testée uniquement sur l'ensemble des valeurs. Les résultats étaient analysés à partir des critères statistiques et de plausibilité suivants :

- la significativité de l'association (seuil retenu à  $p < 0,05$ ) ;
- 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 et les précipitations, une forme croissante monotone de la relation était attendue. Pour le débit une forme partiellement croissante était attendue (en « U » avec une branche droite dominante) alors que pour la température de l'air, une forme partiellement décroissante était attendue (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.

#### 3.6.1.2 Analyses multi-lags

Après l'étude *lag par lag*, les covariables d'exposition présentant des résultats répondants aux critères statistiques et de plausibilité ont été moyennées sur 3 *lags* successifs et centrées sur la latence attendue (*lags* 6 à 8), conformément à leur position sur le parcours de l'eau de la ressource jusqu'à l'exposition (§ 3.3.1).

### 3.6.2 Analyses multi-exposition

Sur la base des résultats obtenus après l'analyse multi-lags, les covariables pertinentes ont été sélectionnées ou non pour construire le modèle multi-exposition.

La validation croisée du modèle multi-exposition retenu a été réalisée en remplaçant le nombre de cas de GEAm enfants par le nombre de cas de GEAm adultes. Les conséquences attendues de cette manipulation étaient la mise en évidence d'un risque de GEAm de type similaire, c'est-à-dire d'un niveau éventuellement différent mais sans stricte modification de la forme des relations et/ou de la significativité des associations.

## 4. Résultats

### 4.1 Qualité des données

Les deux indicateurs sanitaires utilisés (spe115 et spe16p) ne présentent que 3,14 % de données manquantes, dont un mois complet en juin 2004 (tableau 2). La série de cas de GEAm chez les enfants présente 23 valeurs nulles dont 14 (61 %) apparaissent un dimanche. La série de cas chez les adultes présente 7 valeurs nulles dont 3 (43 %) apparaissent un dimanche. Le nombre moyen de cas de GEAm chez les adultes est environ 2,2 fois supérieur au nombre de cas moyen chez les enfants. Les données démographiques de la zone d'étude, fournie par l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) montrent que la population adulte représente plus de 4 fois la population enfant.

**Tableau 2 : Caractéristiques des distributions des variables utilisées.**

Variables	Unité	Valeurs manquantes (%)	Valeurs nulles (%)	Moyenne	Écart-type	Quantiles						
						Min	Q2	Q25	Q50	Q75	Q98	Max
cas GEAm 1-15 ans	nb.cas	3,1	1,2	14,4	10,1	0	1	7	13	20	40	65
cas GEAm 16 ans et +		3,1	0,4	32,4	22,6	0	2	15	31	44	92	166
Précipitations Jo.1	mm	1,5	55,5	1,6	3,6	0	0	0	0	2	15	33
Précipitations Jo.2		0,2	54,0	1,6	3,7	0	0	0	0	1	14	49
Précipitations Iv.1		0,0	57,1	1,5	3,4	0	0	0	0	1	13	27
Précipitations Iv.2		1,5	53,4	1,5	3,3	0	0	0	0	2	12	34
Temp. Air	°C	0,0	0,1	12,9	6,7	-5,8	0,2	7,8	13,1	18,0	25,6	32,5
Temp. eau Marne		5,6	0,1	13,5	6,4	0,0	3,2	7,9	13,5	19,2	24,4	27,0
Temp. eau Seine		4,8	0,0	15,1	6,4	3,0	5,1	9,5	14,7	20,9	26,2	28,5
Temp. eau pondérée		0,4	0,0	14,2	6,4	0,3	3,8	8,7	14,1	19,9	25,3	27,5
Débit Marne	m <sup>3</sup> /s	1	0	96	81	19	26	47	63	110	355	499
Débit Seine		1	0	190	148	44	60	93	128	230	663	840
Débit produit Joinville	m <sup>3</sup> /j	4,48	1	118 257	40 315	0	76 767	82 800	98 400	162 200	199 669	279 600
Débit produit Ivry		7,72	1	110 246	40 636	0	47 950	82 658	98 458	150 000	188 000	255 504
Débit produit total		12,16	0	223 093	49 549	76 320	136 309	180 303	227 070	256 423	332 218	386 590
Turbidité Marne	NTU	7,8	0	14,8	16,9	3,4	4,9	7,1	8,9	12,8	77,7	149
Turbidité Seine		5,6	0	15,6	12,9	5,0	6,9	9,5	11,6	15,4	64,9	124
Turbidité Joinville	NFU	10,3	0	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,19
Turbidité Ivry		11,3	0	0,05	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,10	0,14
Turbidité pondérée		1,35	0	0,04	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,08	0,19
Chlore min Jo	mg/l	7,52	0	0,67	0,07	0,20	0,53	0,63	0,67	0,72	0,81	0,91
Chlore min Iv		8,77	0,05	0,61	0,06	0,00	0,50	0,57	0,61	0,65	0,72	0,80
Chlore minimum		0,35	0	0,64	0,05	0,34	0,54	0,61	0,64	0,68	0,76	0,87

Les chroniques de mesure de turbidité de l'eau brute de la Marne et de la Seine présentent respectivement 7,8 % et 5,6 % de données manquantes.

La chronique de mesure de turbidité de l'eau produite à Joinville présente 207 données manquantes (10,3 %) dont 4 sont dues à des périodes où l'usine était en arrêt de production. À Ivry, la chronique de turbidité de l'eau produite présente 227 données manquantes (11,3 %) dont 6 sont dues à des arrêts de production.

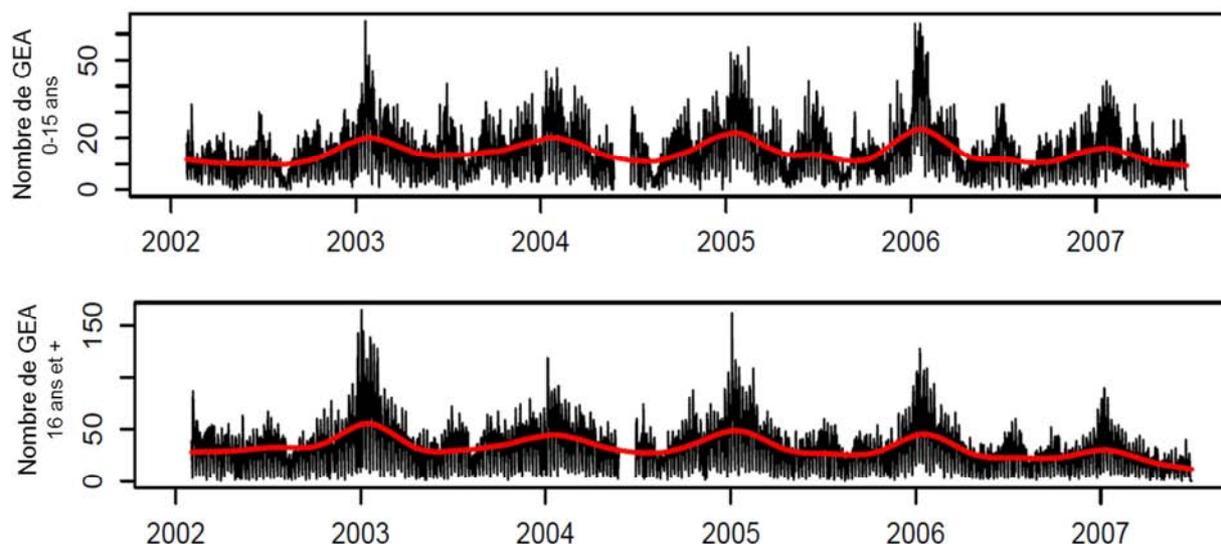
## 4.2 Distribution des variables

### 4.2.1 Indicateurs sanitaires

La série chronologique du nombre de cas de GEAm chez les enfants suit les pics hivernaux des épidémies virales de gastro-entérites (figure 2). Le maximum de 65 cas de GEAm a été observé le 20 janvier 2003 et correspond à environ 4,5 fois le nombre de cas moyen sur l'ensemble de la chronique.

Chez les cas adultes, le maximum de 166 cas de GEAm a été observé le 3 janvier 2003. Il correspond à 5,1 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 le secteur de Paris-Centre sur la même période [10].

**Figure 2 : Séries temporelles du nombre de cas quotidiens de gastro-entérites aiguës médicalisées dans les 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> arrondissements de Paris, chez les enfants (0-15 ans) et les adultes (16 ans et plus), entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 30 juin 2007 (source Cnam-TS).**

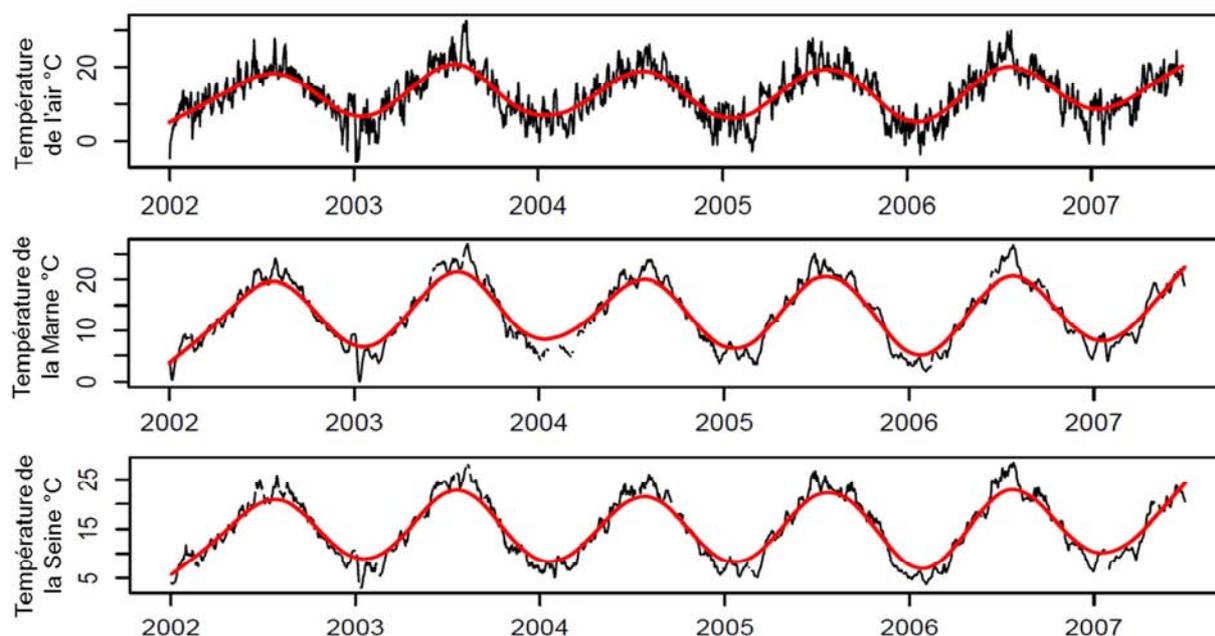


### 4.2.2 Températures

Sur toute la période 2002-2007, les températures moyennes de l'air enregistrées à la station de Paris-Montsouris sont dans les normales saisonnières. Le minimum de  $-5,8\text{ °C}$  a été observé le 5 janvier 2003 et le maximum de  $32,5\text{ °C}$  le 11 août 2003, durant l'épisode caniculaire (figure 3).

Les chroniques de température des eaux de la Marne et de la Seine présentent les mêmes tendances que la chronique de température de l'air. Sur la Seine, le maximum de température de l'eau de  $28,5\text{ °C}$  était mesuré le 26 juillet 2006 et le minimum de  $3,0\text{ °C}$  le 13 janvier 2003. Sur la Marne, le maximum de  $27,0\text{ °C}$  était mesuré le 13 août 2003 et le minimum de  $0\text{ °C}$  le 12 janvier 2003. La Seine affiche une température moyenne supérieure à celle de la Marne de  $1,6\text{ °C}$ .

**Figure 3 : Séries temporelles des températures de l'air à Paris Montsouris, de la Marne à Joinville-le-Pont et de la Seine à Ivry-sur-Seine, entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 30 juin 2007 (source Sagep).**



## 4.2.3 Eau brute

### 4.2.3.1 Qualité microbiologique

Les données d'autocontrôle d'Eaux de Paris ont été utilisées afin d'évaluer la qualité microbiologique des eaux brutes de la Marne à Joinville-le-Pont et de la Seine à Ivry-sur-Seine sur la période 2002-2007. Les paramètres coliformes totaux, *E. coli* et entérocoques 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).

**Tableau 3 : Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes utilisées dans les usines de Joinville-le-Pont et d'Ivry-sur-Seine, entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 30 janvier 2007 (source Sagep).**

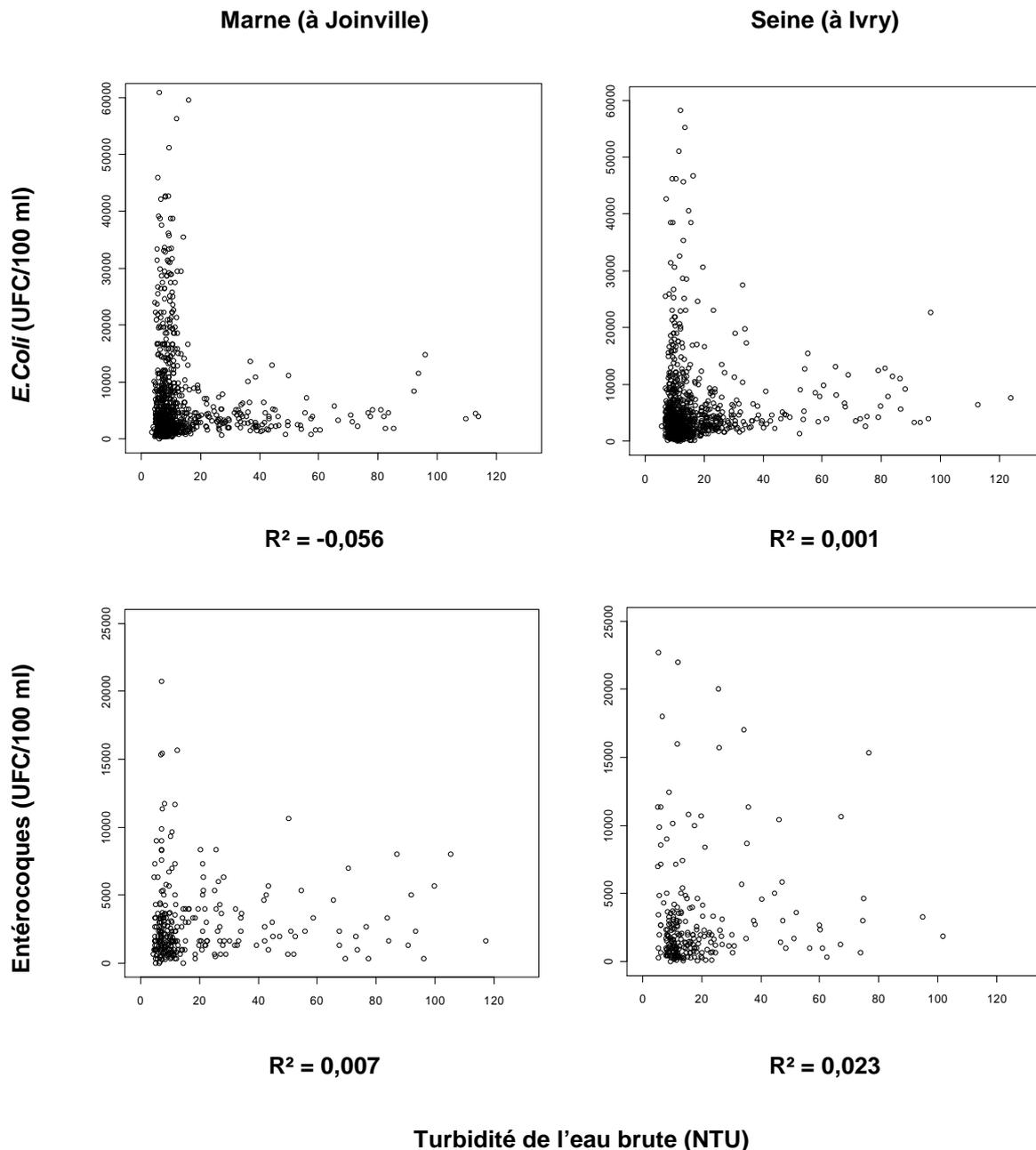
Lieu	Paramètre	nombre d'analyses	Moyenne	Écart - type	Quantiles						
					Min	Q2	Q25	Q50	Q75	Q98	Max
Marne (Joinville)	<i>E.coli</i> /100 ml	1 065	6 659	10 034	19	530	2 000	3 340	6 870	34 969	124 800
	Entérocoques/100 ml	286	3 267	5 134	0	319	1 143	2 000	3 656	12 800	60 667
	Coliformes totaux/100 ml	419	18 859	33 147	667	2 000	6 667	11 333	19 501	94 507	477 333
Seine (Ivry)	<i>E.coli</i> /100 ml	1 120	6 212	13 900	0	460	1 760	3 140	5 608	37 297	239 500
	Entérocoques/100 ml	253	3 890	6 680	0	146	867	1 857	3 533	26 508	55 714
	Coliformes totaux/100 ml	430	29 680	55 508	40	2 778	8 000	13 333	29 333	211 734	571 429

La Marne et la Seine présentent des profils similaires de contamination microbiologique d'origine fécale. Le niveau de contamination moyen par les *E. coli* est d'environ 6 400 UFC/100 ml et le niveau de contamination moyen par les entérocoques d'environ 3 500 UFC/100 ml.

La Seine présente un niveau de contamination microbiologique général plus élevé que celui de la Marne avec près de 30 000 UFC/100 ml de coliformes totaux contre moins de 19 000 UFC/100 ml pour la Marne.

Les analyses de régression réalisées ne montrent pas de corrélation entre les niveaux de turbidité des deux rivières et leurs niveaux de contamination microbiologiques d'origine fécale (figure 4).

**Figure 4 : Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes (UFC/100 ml) en fonction de la turbidité sur la période 2002-2007. Données censurées au-delà de 60 000 UFC pour les *E. Coli*, 25 000 UFC pour les Entérocoques et 130 NTU pour les eaux brutes (source Sagep).**



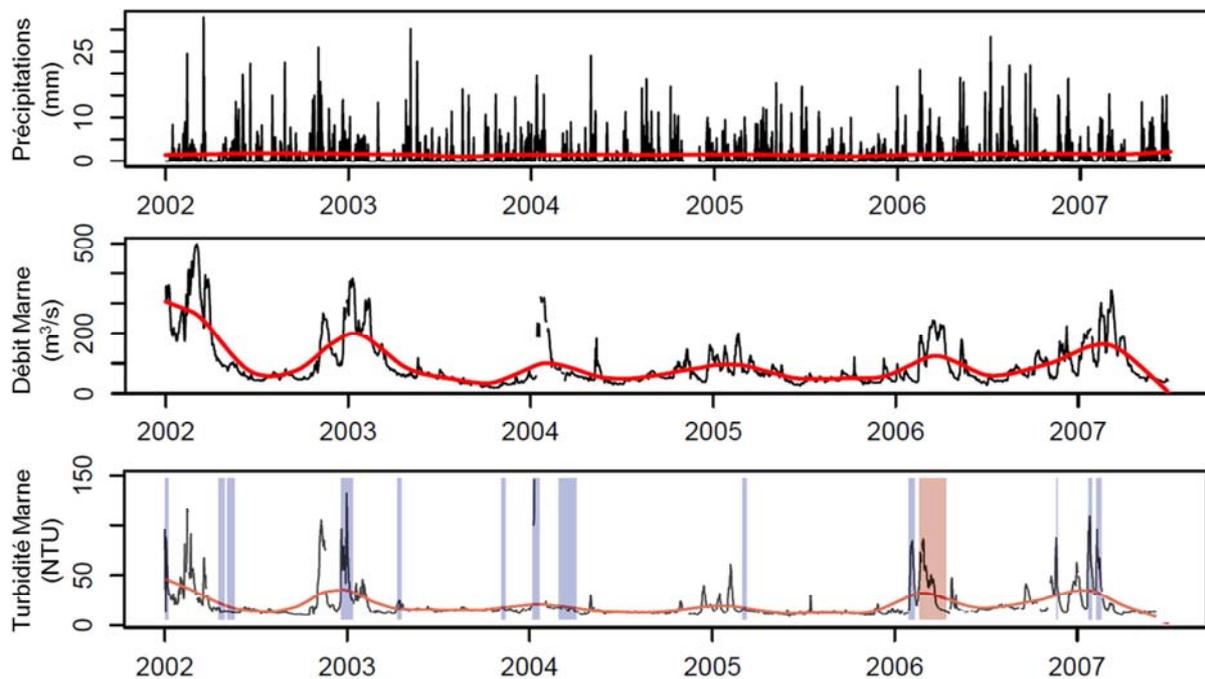
#### 4.2.3.2 Débit et turbidité des eaux de la Marne (Joinville-le-Pont)

Les chroniques de turbidité et de débit de la Marne présentent une saisonnalité similaire sur l'ensemble de la période d'étude (figure 5). Celle-ci est très marquée par la présence de pics hivernaux d'intensité variable.

Lors de ces pics, le débit moyen de la Marne ( $96 \text{ m}^3/\text{s}$ ) peut-être multiplié par un facteur 2 à 5 selon l'année considérée. Les hivers 2002 et 2003 présentent les plus fortes variations de débits. Ces fortes crues hivernales entraînent l'apparition simultanée de pics de turbidité marquant la dégradation de la qualité de l'eau. Lors de ces crues, la turbidité dépasse  $78 \text{ NTU}$  (p98) contre  $15 \text{ NTU}$  en moyenne.

Aucune corrélation n'a été mise en évidence entre les chroniques des précipitations mesurées à Joinville-le-Pont (figure 5) ou Saint-Maur-des-Fossés (non montrée) et la chronique de turbidité de la Marne.

**Figure 5 : Séries temporelles des précipitations (source Météo-France), du débit et de la turbidité de la Marne (source Sagep) à Joinville-Le-Pont et périodes de fonctionnement de la flottation et de la décantation dans l'usine de Joinville, entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 30 juin 2007.**



*En bleu : période de mise en œuvre de la flottation. En rouge, période de mise en œuvre de la décantation.*

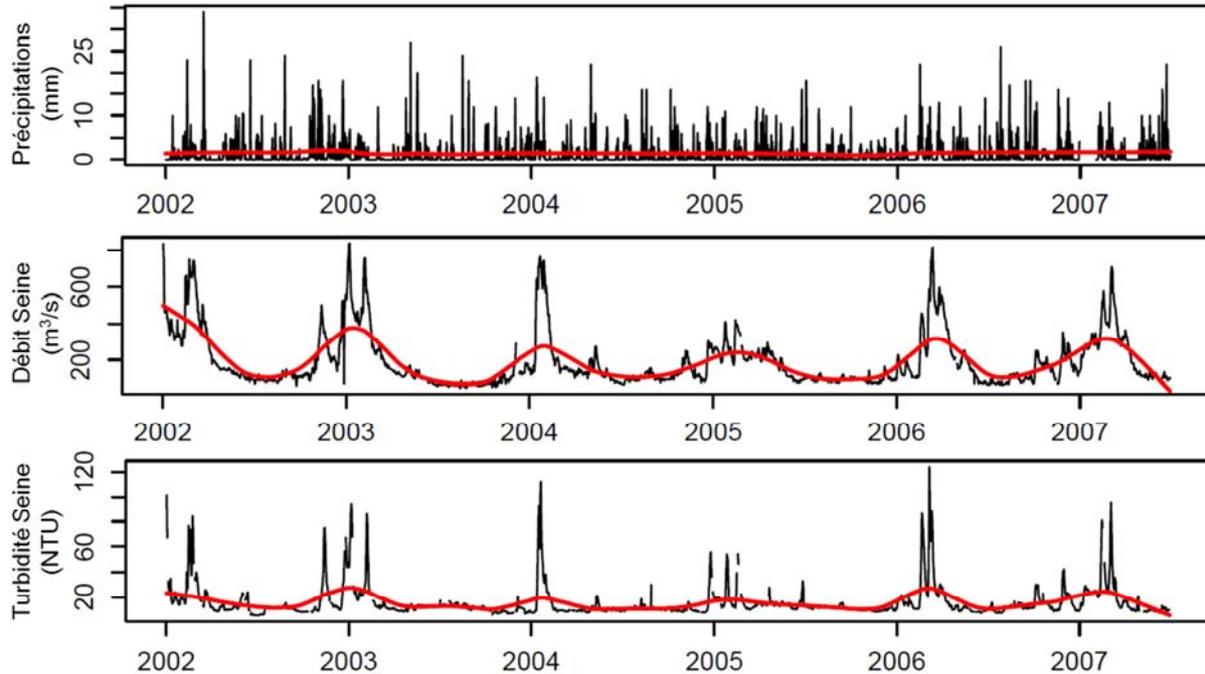
#### 4.2.3.3 Débit et turbidité des eaux de la Seine (Ivry-sur-Seine)

Comme pour les eaux de la Marne, les chroniques de turbidité et de débits de la Seine présentent une saisonnalité similaire marquée par d'intenses pics hivernaux (figure 6).

Les pics de débits représentent de 3 à 4 fois le débit moyen ( $190 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les crues sont régulières sur l'ensemble de la période d'étude, excepté pour l'hiver 2005 pour lequel l'intensité était nettement plus faible. Les crues hivernales sont simultanément accompagnées de pics de turbidité marquant la dégradation de la qualité de l'eau. Lors de ces pics de turbidité, le niveau peut augmenter jusqu'à  $65 \text{ NTU}$  (p98) contre  $16 \text{ NTU}$  en moyenne.

Aucune corrélation n'a été mise en évidence entre les chroniques des précipitations mesurées à Paris (non montrée) ou Choisy-le-Roi (figure 6) et la chronique de turbidité de la Seine.

**Figure 6 : Séries temporelles des précipitations à Choisy-le-Roi (source Météo-France), du débit et de la turbidité de la Seine (source Sagep) à Ivry-sur-Seine, entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 30 juin 2007.**



## 4.2.4 Eaux produites

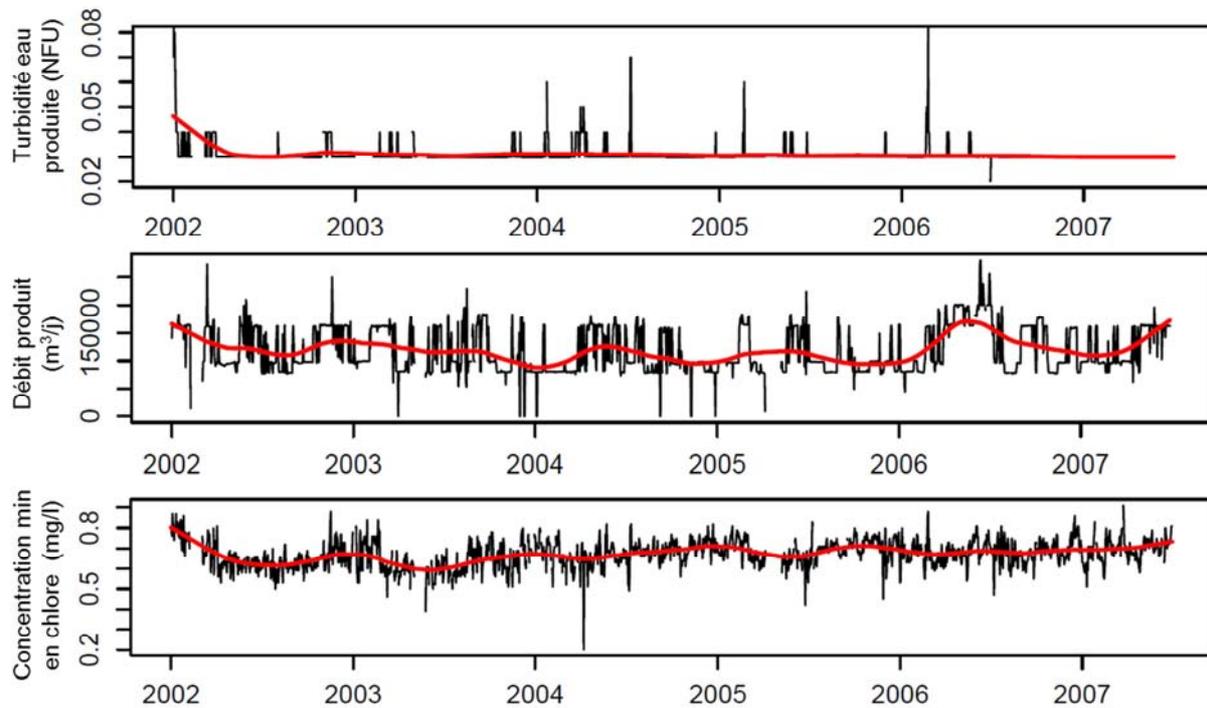
### 4.2.4.1 Usine de Joinville

L'eau produite par l'usine de Joinville présente une turbidité moyenne de 0,03 NFU (figure 7). Le maximum de 0,19 NFU (non montré sur la figure 7) a été observé le 1<sup>er</sup> janvier 2002. La tendance de la turbidité moyenne est d'abord à la baisse durant le premier trimestre 2002 avant de se stabiliser sur l'ensemble du reste de la chronique.

La production moyenne de l'usine est d'environ 118 000 m<sup>3</sup>/j. La tendance est stable sur l'ensemble de la période d'étude, exceptée sur le premier semestre 2006 où l'on observe une hausse de production. Le maximum de production est observé le 14 juin 2006 avec un niveau de plus de 279 000 m<sup>3</sup>/j. Sur la période d'étude, l'usine n'a pas produit d'eau durant 12 jours répartis sur deux périodes : décembre 2003-janvier 2004 d'une part et septembre, novembre, décembre 2004 d'autre part.

La chronique des concentrations minimales en chlore libre en sortie d'usine ne présente qu'une seule valeur nulle mesurée le 7 avril 2004 (figure 7). Selon l'exploitant, cette valeur correspond à une erreur d'enregistrement et ne reflète pas la concentration réelle en chlore libre. Aucune autre valeur n'est inférieure à 0,3 mg/l. Sur l'ensemble de la période d'étude, le minimum moyen en chlore est de 0,67 mg/l.

**Figure 7 : Séries temporelles de la turbidité de l'eau produite, du débit produit et de la concentration minimale en chlore libre à l'usine de Joinville-le-Pont, entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 30 juin 2007 (source Sagep).**



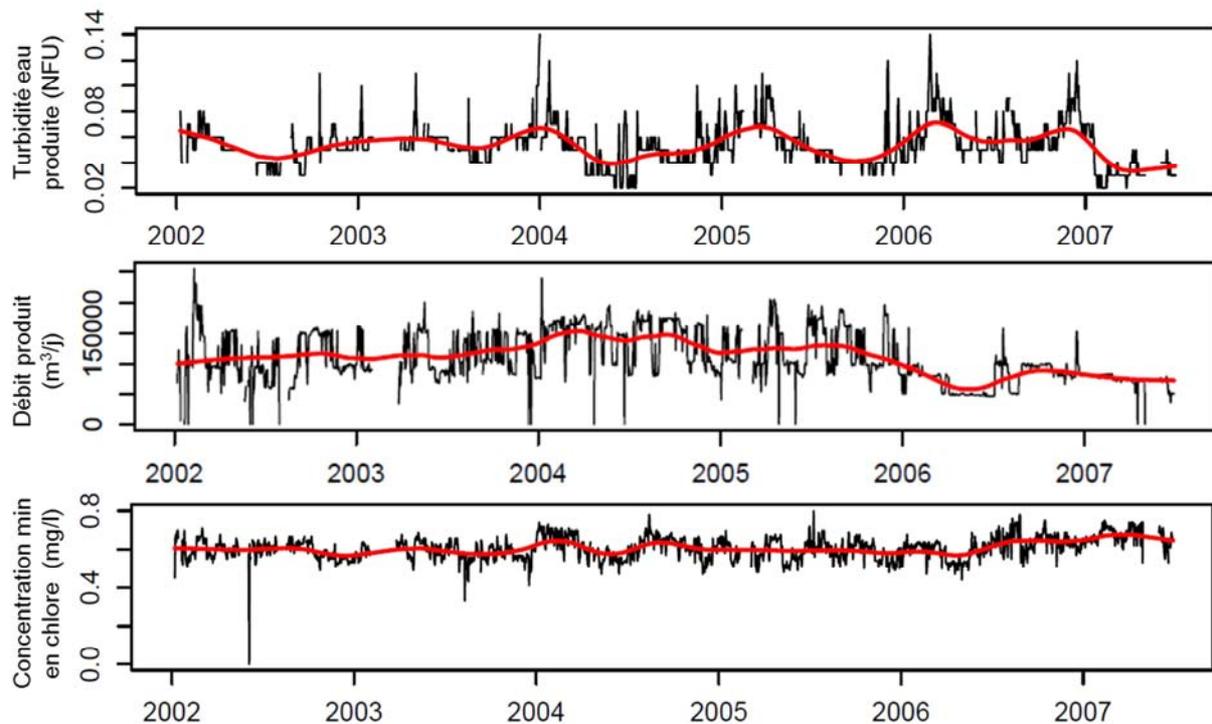
#### 4.2.4.2 Usine d'Ivry

L'eau produite par l'usine d'Ivry présente une turbidité quotidienne moyenne de 0,05 NFU et un maximum à 0,14 NFU qui a été atteint deux fois, en janvier 2004 et février 2006 (figure 8). La tendance montre quelques augmentations de turbidité en périodes hivernales, surtout à partir de l'hiver 2004.

La production moyenne de l'usine d'Ivry est d'environ 110 000 m<sup>3</sup>/j. Elle augmente régulièrement de 2002 jusqu'en 2004 et est sensiblement réduite par la suite en passant de 150 000 m<sup>3</sup>/j début 2004 à moins de 100 000 m<sup>3</sup>/j vers la fin juin 2007. Sur la période d'étude, l'usine n'a pas produit d'eau durant 7 journées (non consécutives). Le pic de production a été atteint le 10 février 2002 avec un débit maximum de plus de 255 000 m<sup>3</sup>/j.

La chronique des concentrations minimales en chlore libre en sortie d'usine présente une valeur minimale de 0,2 mg/l mesurée le 5 juin 2002 (figure 8). Aucune autre valeur n'est inférieure à 0,3 mg/l. Sur l'ensemble de la période d'étude, le minimum moyen en chlore est de 0,61 mg/l.

**Figure 8 : Séries temporelles de la turbidité de l'eau produite, du débit produit et de la concentration minimale en chlore libre à l'usine d'Ivry-sur-Seine, entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 30 juin 2007 (source Sagep).**



#### 4.2.4.3 Mélange des eaux dans les réservoirs

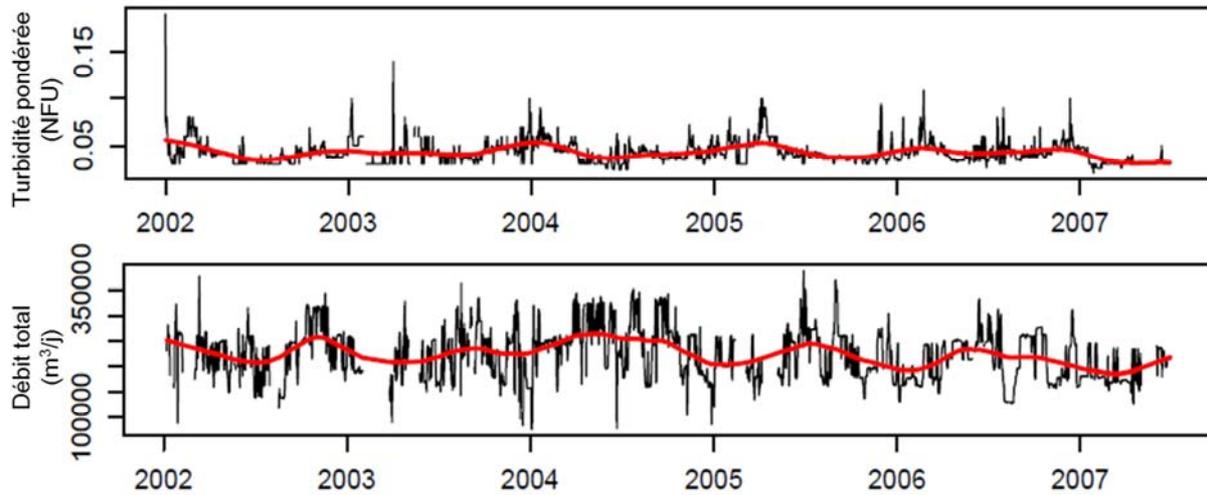
La chronique de la turbidité moyenne pondérée représente la turbidité du mélange des eaux produites à Joinville et Ivry (figure 9). La tendance montre quelques hausses durant les périodes hivernales mais est globalement stable autour de la valeur moyenne de 0,04 NFU sur l'ensemble de la période d'étude. Le maximum de 0,19 NFU a été observé le 1<sup>er</sup> janvier 2002.

Le débit total produit par les deux usines est en moyenne de 223 000 m<sup>3</sup>/j. L'étendue de la production est comprise entre un minimum de 76 000 m<sup>3</sup>/j le 5 janvier 2004 et un maximum de 386 000 m<sup>3</sup>/j le 29 juin 2005 (figure 9). La tendance de la production totale est globalement stable entre janvier 2002 et juin 2007.

### 4.3 Relation entre la turbidité de l'eau produite et l'incidence des GEA

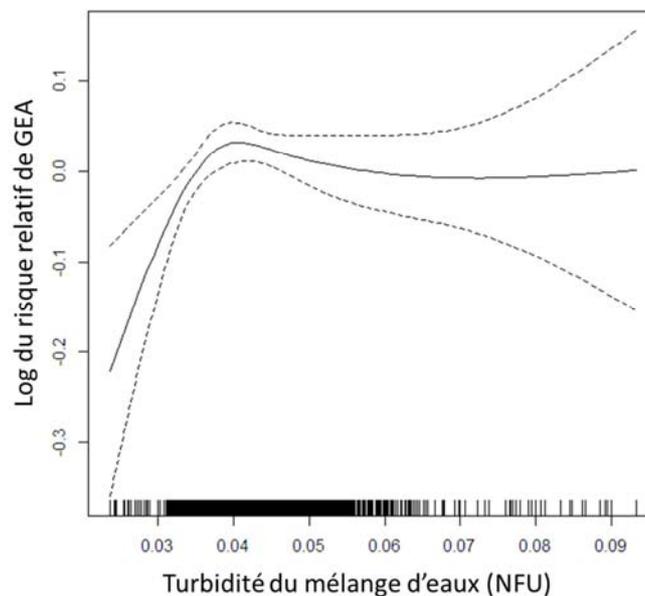
Les premières analyses réalisées ont consisté à tester l'effet de la turbidité du mélange des eaux produites à Joinville et Ivry sur le nombre de cas incidents de GEAm observés. Ce test concernait donc la moyenne des deux turbidités pondérée par les débits produits, après contrôle de la température de l'eau brute (moyenne des *lags* 6 à 8).

**Figure 9 : Séries temporelles de la turbidité du mélange des eaux produites à Ivry-sur-Seine et Joinville-le-Pont et du débit total des deux usines, entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 30 juin 2007 (source Sagep).**



La relation entre la turbidité et l'incidence des GEAm chez les 1-15 ans est de forme croissante sur la plage de turbidité comprise entre 0,02 et 0,04 NFU (figure 10). Au-delà de 0,04 NFU, la relation atteint un plateau et le risque n'évolue plus. L'association est significative ( $p=0,015$ ). L'augmentation du risque de GEAm est de l'ordre de 10 à 12 % pour une variation de turbidité comprise entre 0,03 et 0,04 NFU.

**Figure 10 : Variation du risque de GEAm (log) chez les moins de 16 ans en fonction de la turbidité du mélange d'eaux produites à Ivry et Joinville, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**



Après l'exclusion des valeurs de turbidité supérieures au percentile 98, la forme de la relation et le niveau de significativité de l'association sont conservés ( $p=0,016$ ).

## 4.4 Recherche d'autres facteurs de risque

Dans une seconde étape de l'analyse, chacune des covariables d'exposition disponibles a été testée *lag* par *lag* (du *lag* 1 à 15) comme variable explicative dans le modèle.

Les résultats (tableau 4) montrent le degré de significativité statistique de l'association et l'adéquation par rapport à la forme attendue de la relation entre chaque covariable mesurée au jour  $j$  et le nombre quotidien de cas de GEAm survenus entre  $j+5$  et  $j+15$ . Dans le tableau 4 les résultats chiffrés expriment la significativité des associations, quantifiées par  $-\log(p)$ . Une absence de chiffre dénote un test non significatif pour la latence considérée. La plausibilité de la forme des fonctions de risque observées (cohérence avec la tendance attendue) et leurs cohérences sur plusieurs latences successives y sont également présentées.

**Tableau 4 : Résultats de l'analyse exploratoire des associations entre l'incidence des GEAm chez les 1-15 ans et les variables d'exposition pour différentes latences de l'effet (2002-2007).**

Variable	Contrainte	latence (jour)											Tendance attendue			
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
Précipitations	Joinville 1	p100					1		1							↗
	p98									1						
	Joinville 2	p100					1			1						↗
	p98				1				1							
Ivry 1	p100					1		1							↗	
p98	1			1			1	1								
Ivry 2	p100					1									↗	
p98							1									
Température	Air Paris	p100						1	1							U
	p98							1	1							
	Eau Joinville	p100														
	p98									1	1	1	1			
Eau Ivry	p100	1	2	3	4	3	1	1	2	2	3	3				
p98	1	3	3	4	3	1	2	3	3	5	5					
Eau Moyenne	p100				1	2	2	1	1	1	2	1	1			
p98				1	2	2	1	1	2	3	2	2				
Turbidité Eau Produite	Joinville	p100				2	1							1	↗	
	p98				1	1	1									
	Ivry	p100													↗	
p98			1													
Moyenne	p100			2	1							1		↗		
p98			1	1	1											
Débit Produit	Joinville	p100												1	↗	
	p98															
	Ivry	p100	1												↗	
p98	1	1														
Total	p100	1	2	2	1	1		1				1	1	↗		
p98	2	2	2	1	1		1	1		1	1	1				
Proportion débit Produit	Joinville	p100														
	p98															
Ivry	p100															
p98				1				1		2	2	2				
Turbidité Eau Brute	Joinville	p100													↗	
	p98															
Ivry	p100	2	2	1	2	2	2	2	3	3	2	1		↗		
p98	3	3	3	4	2	2	2	2	3	3	2	1				
Débit Ressource	Marne	p100	2	1	2	2	1	1	1	2	2	3	4	↗		
	p98	2	1	2	1	1			1	1	2	4				
Seine	p100	1	1	1	1				1	2	2	3	2	↗		
p98		1		1						1	1	1				
Concentration minimale en Chlore	Joinville	p100					1						1	↘		
	Ivry	p100	1		2											
	Moyenne	p100		1	1	2								↘		

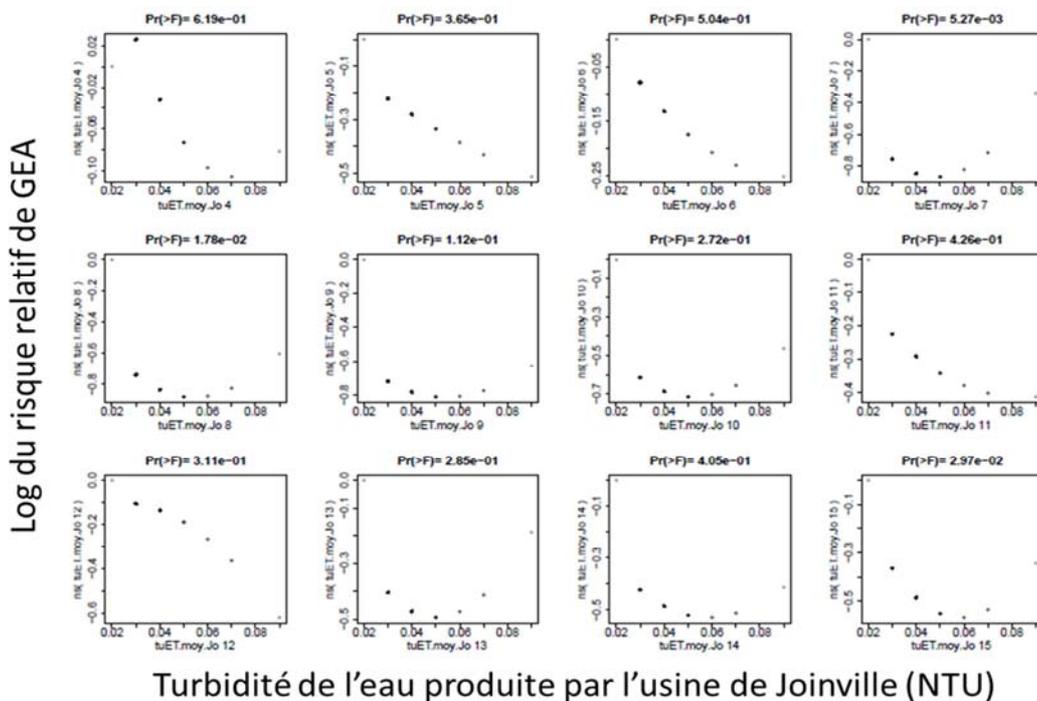
 forme de la relation conforme à la tendance attendue  
 forme de la relation partiellement conforme à la tendance attendue  
 le chiffre indique le degré de significativité (1=p<0,1 ; 2=p<0,01 ; 3=p<0,001 ; 4=p<0,0001)

## 4.4.1 Relation entre l'incidence des GEAm et la turbidité de l'eau produite

### 4.4.1.1 Turbidité de l'eau produite à Joinville

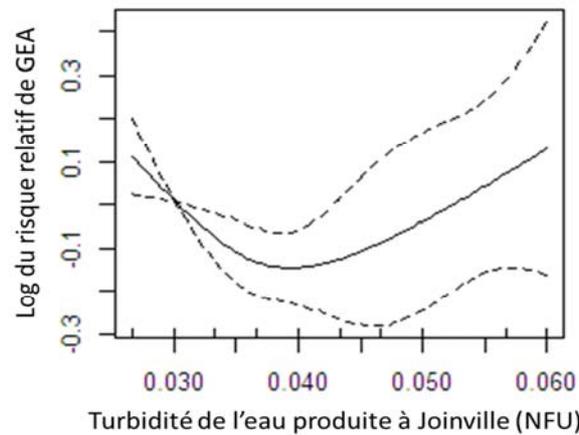
La relation entre la turbidité de l'eau produite à Joinville et l'incidence des GEAm est majoritairement décroissante entre 0,02 et 0,05 NFU sur l'ensemble des latences étudiées (figure 11). Seules les associations aux lags 7 et 8 sont significatives ( $p < 0,01$  et  $p < 0,05$ ), les relations sont alors en forme de « U » avec un minimum situé à 0,05 NFU. L'exclusion des valeurs supérieures au percentile 98 rend les relations strictement décroissantes sur les lags 7 à 10.

**Figure 11 : Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité moyenne quotidienne de l'eau produite par l'usine de Joinville-le-Pont, pour différentes latences de l'effet de 4 à 15 jours (2002-2007).**



La modélisation réalisée à partir de la turbidité moyenne sur les latences 6 à 8 est cohérente avec les résultats ci-dessus (figure 12). La relation est décroissante entre 0,02 et 0,04 NFU et l'association est significative ( $p=0,003$ ).

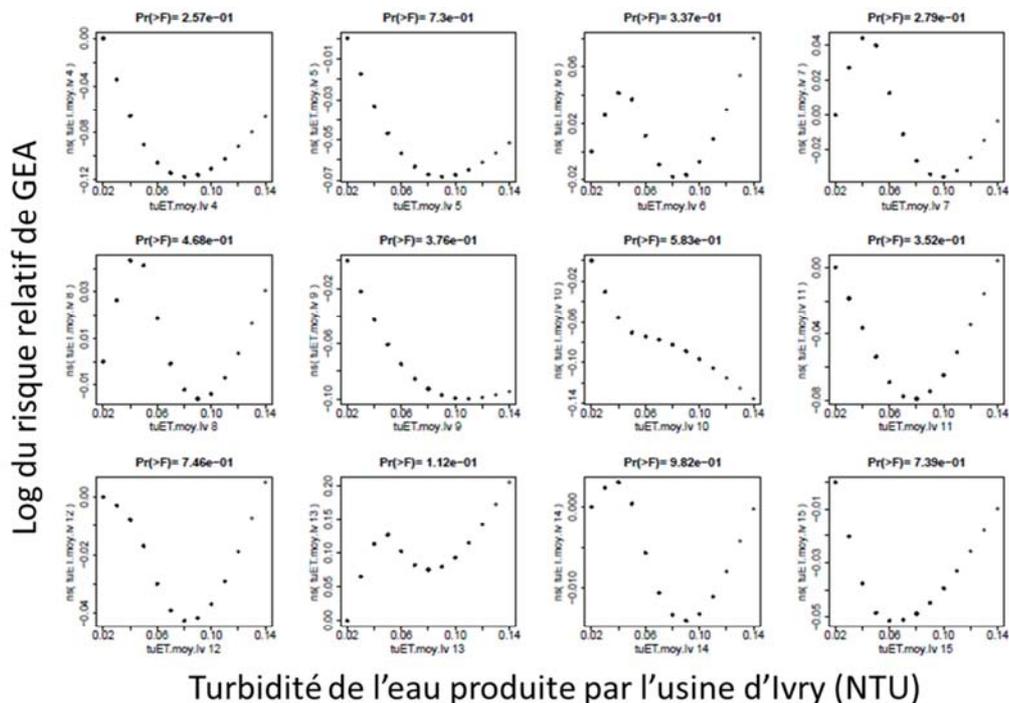
**Figure 12 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité de l'eau produite à Joinville-le-Pont, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**



#### 4.4.1.2 Turbidité de l'eau produite à Ivry

La forme des relations entre la turbidité de l'eau produite à Ivry et l'incidence des GEAm apparaît décroissante sur l'ensemble des latences étudiées et sur une plage de valeurs de turbidité comprise entre 0,04 et 0,08 NFU (figure 13).

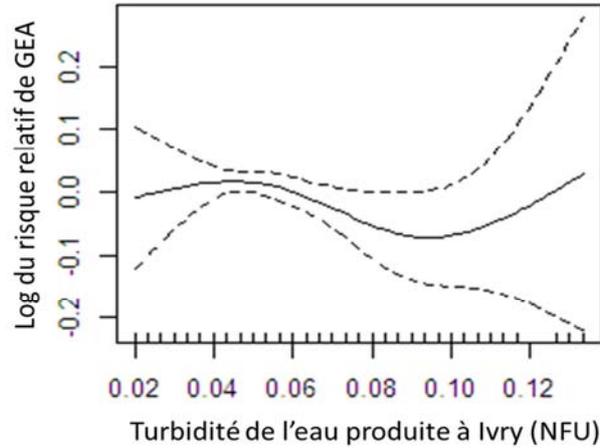
**Figure 13 : Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité moyenne quotidienne de l'eau produite par l'usine d'Ivry-sur-Seine, pour différentes latences de l'effet de 4 à 15 jours (2002-2007).**



Aucune de ces associations n'est significative ( $p > 0,05$ ). En dehors de la plage 0,04 NFU-0,08 NFU, les relations ne présentent pas de formes cohérentes sur l'ensemble des latences étudiées.

La modélisation à partir de la variable moyenne sur les latences 6 à 8 confirme les résultats ci-dessus et montre une relation légèrement décroissante entre 0,04 et 0,08 NFU (figure 14). L'association n'est pas significative ( $p=0,24$ ).

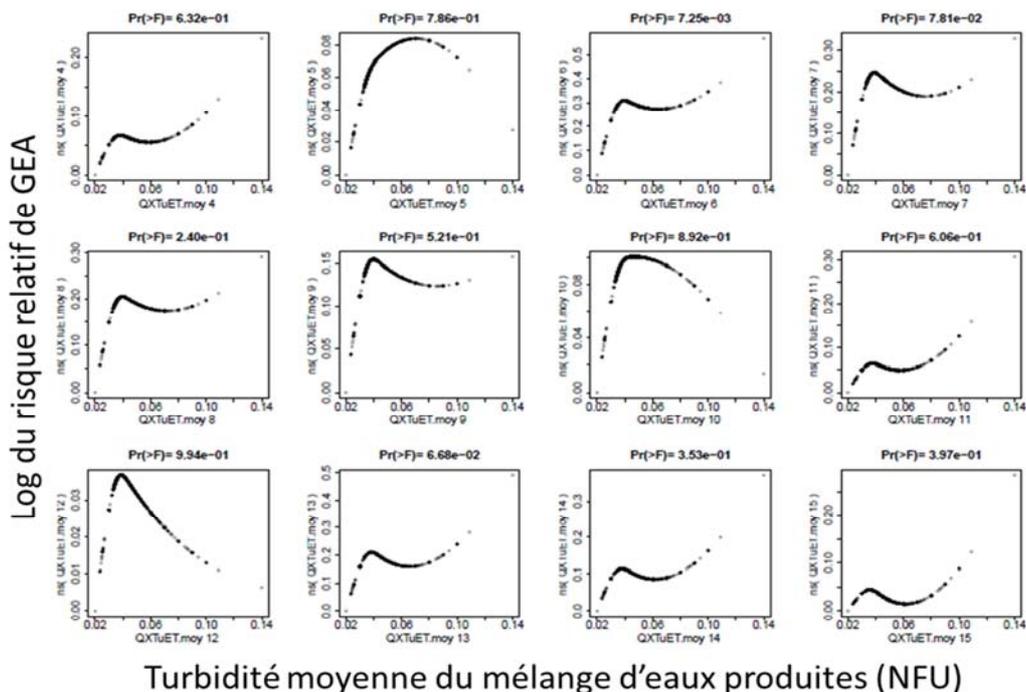
**Figure 14 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité de l'eau produite à Ivry-sur-Seine, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**



#### 4.4.1.3 Turbidité moyenne pondérée des eaux produites

La relation entre la turbidité du mélange des eaux produites et l'incidence des GEAm apparaît croissante entre 0,02 et 0,04 NFU sur l'ensemble des lags étudiés (figure 15). Au-delà de 0,04 NFU, la relation atteint un plateau. Seule l'association au lag 6 est significative ( $p<0,05$ ). La suppression des valeurs de turbidité supérieures au percentile 98 tend à rendre la relation décroissante au-delà de 0,04 NFU.

**Figure 15 : Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité moyenne quotidienne du mélange des eaux produites à Joinville-le-Pont et Ivry-sur-Seine, pour différentes latences de l'effet de 4 à 15 jours (2002-2007).**



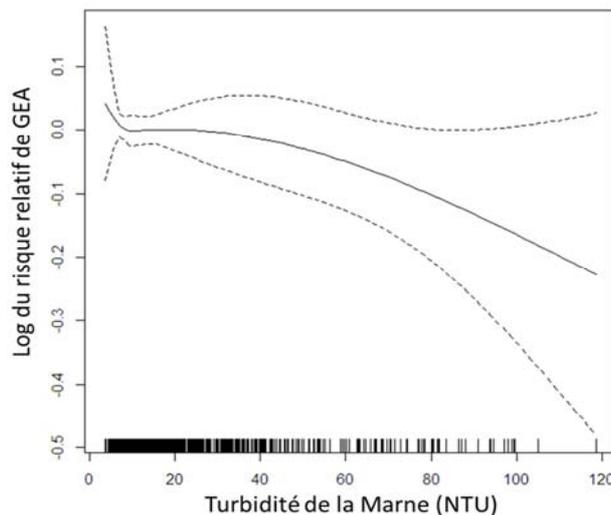
## 4.4.2 Relation entre l'incidence des GEAm et la turbidité de l'eau brute

### 4.4.2.1 Turbidité de la Marne

La forme de la relation entre la turbidité de l'eau de la Marne et l'incidence des GEAm est majoritairement décroissante sur la plage de *lags* étudiés (résultats non présentés). Aucune association n'est significative. La suppression des valeurs supérieures au percentile 98 ne montre aucune association significative.

La modélisation à partir d'une moyenne de la turbidité de la Marne sur les latences 6 à 8 montre une relation décroissante (figure 16). L'association entre cette variable et l'incidence des GEAm n'est pas significative ( $p=0,24$ ).

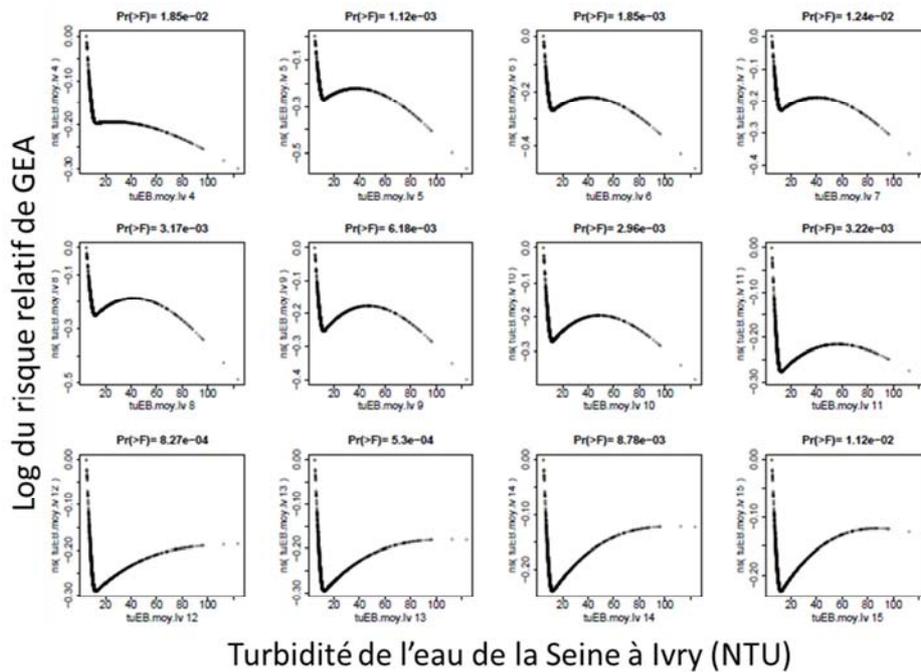
**Figure 16 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité de l'eau de la Marne, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**



### 4.4.2.2 Turbidité de la Seine

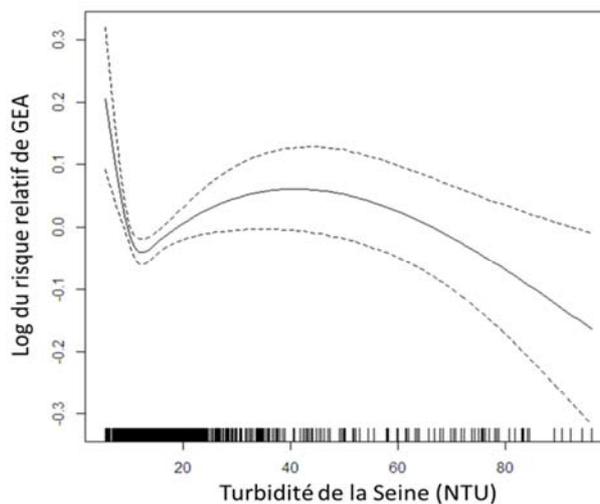
La relation entre la turbidité de la Seine et l'incidence des GEAm est stable sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 17) et montre une forte décroissance entre le minimum de turbidité (5 NTU) et le percentile 25 (9,5 NTU). La forme de la relation est croissante entre 10 et 40 NTU. L'ensemble des associations sont significatives au seuil de  $p<0,05$ . La suppression des valeurs extrêmes ( $>p98$ ) ne modifie pas la forme des relations.

**Figure 17 : Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité moyenne quotidienne de la Seine, pour des latences de l'effet comprises entre 4 et 15 jours (2002-2007).**



La modélisation à partir d'une moyenne calculée sur les latences 6 à 8 montre une relation dont la forme est conforme aux résultats ci-dessus (figure 18). L'association est très significative ( $p=0,0004$ ).

**Figure 18 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité de l'eau de la Seine, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**

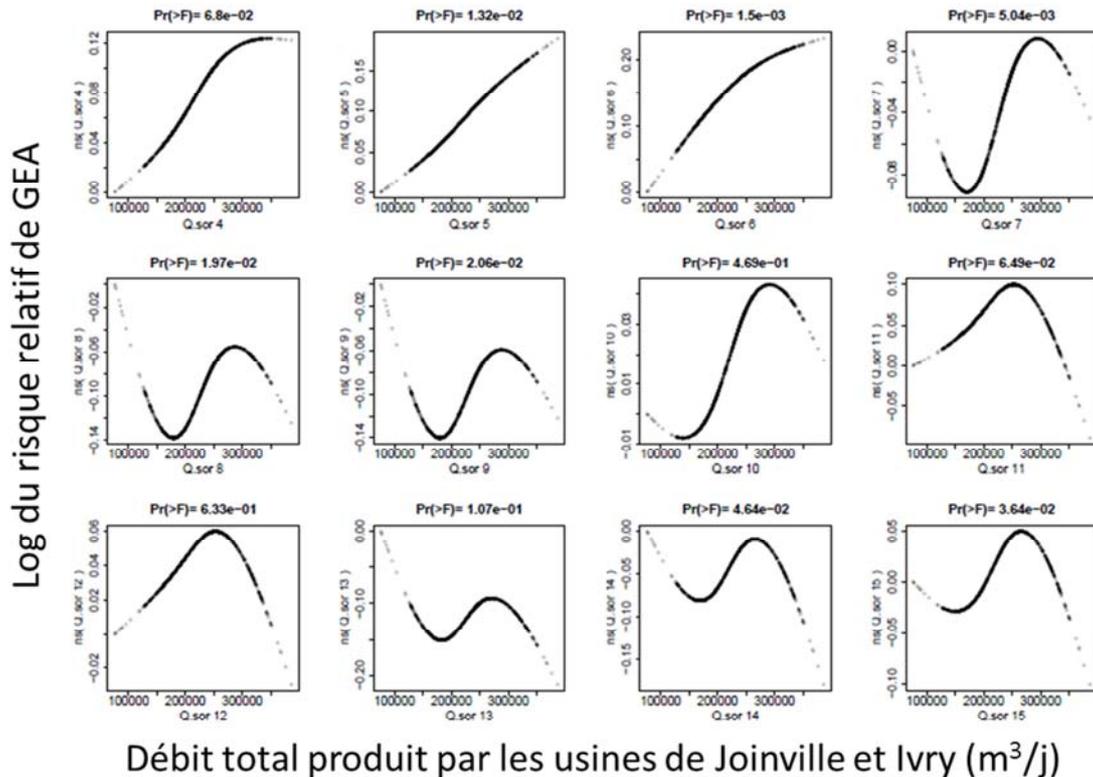


### 4.4.3 Relation entre l'incidence des GEAm et les débits produits

#### 4.4.3.1 Débit total produit

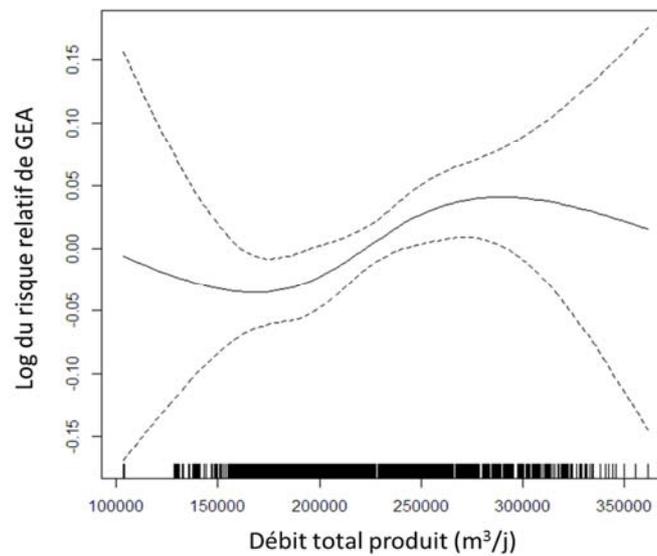
Sur l'ensemble des *lags* étudiés, la forme de la relation entre le débit total produit et l'incidence des GEAm est croissante sur la plage interquartile du débit, de 180 303 à 256 423 m<sup>3</sup>/j (figure 19). Toutes les associations sont significatives ( $p < 0,05$ ). La suppression des valeurs extrêmes ( $> p98$ ) ne modifie pas la forme des relations et n'affecte pas la significativité des associations.

**Figure 19 : Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction du débit total produit par les usines de Joinville et Ivry, pour des latences de l'effet comprises entre 4 et 15 jours (2002-2007).**



La modélisation à partir d'une variable débit total moyenné sur les latences 6 à 8 montre également une relation croissante entre le débit total produit et l'incidence des GEAm (figure 20). L'association n'est pas significative ( $p = 0,07$ ). Ni la forme de la relation, ni la significativité ne sont modifiées par la suppression des valeurs supérieures au percentile 98.

**Figure 20 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction du débit total produit par les usines de Joinville et Ivry, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**

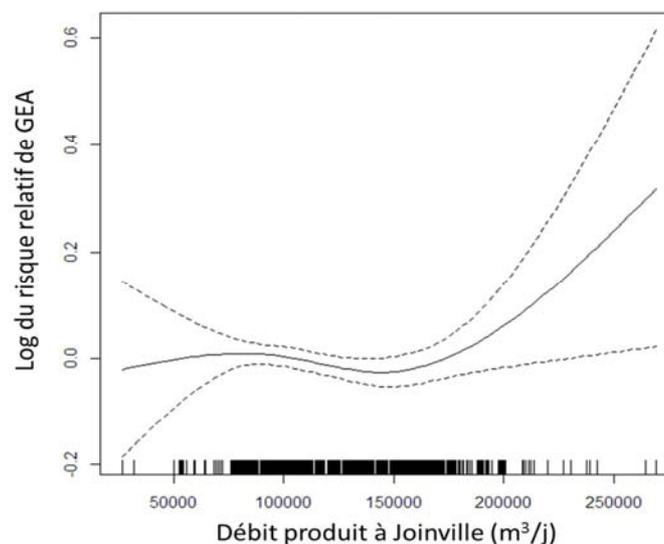


#### 4.4.3.2 Débit produit par l'usine de Joinville-le-Pont

Sur l'ensemble des *lags* étudiées, la relation entre le débit produit à Joinville et l'incidence des GEAm apparaît instable. Les associations ne sont pas significatives.

La modélisation à partir d'une variable débit moyen calculée sur les *lags* 6 à 8 montre une relation légèrement décroissante (figure 21) pour une augmentation interquartile du débit (de 82 800 à 162 200 m<sup>3</sup>/j), puis légèrement croissante au-delà. L'association n'est pas significative ( $p=0,13$ ).

**Figure 21 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction du débit produit par l'usine de Joinville-le-Pont, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**

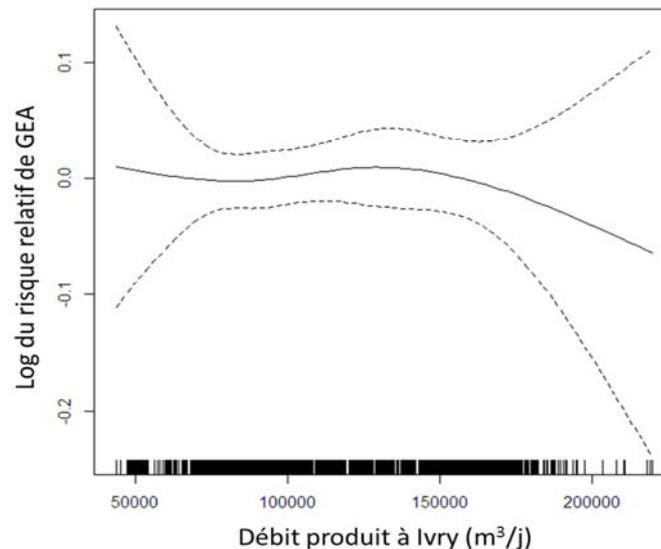


#### 4.4.3.3 Débit produit par l'usine d'Ivry-sur-Seine

Entre les *lags* 5 à 8, la relation entre le débit produit à Ivry et l'incidence des GEAM apparaît croissante entre 0 et 100 000 m<sup>3</sup>/j, puis instable au-delà. Seule l'association au *lag* 5 est significative ( $p=0,05$ ).

La modélisation à partir d'une variable moyenne sur les *lags* 6 à 8 montre une relation totalement plate sur l'ensemble des valeurs de débit produit (figure 22). L'association n'est pas significative ( $p=0,91$ ).

**Figure 22 : Variation du risque de GEAM (log) chez les 1-15 ans en fonction du débit produit par l'usine d'Ivry-sur-Seine, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**

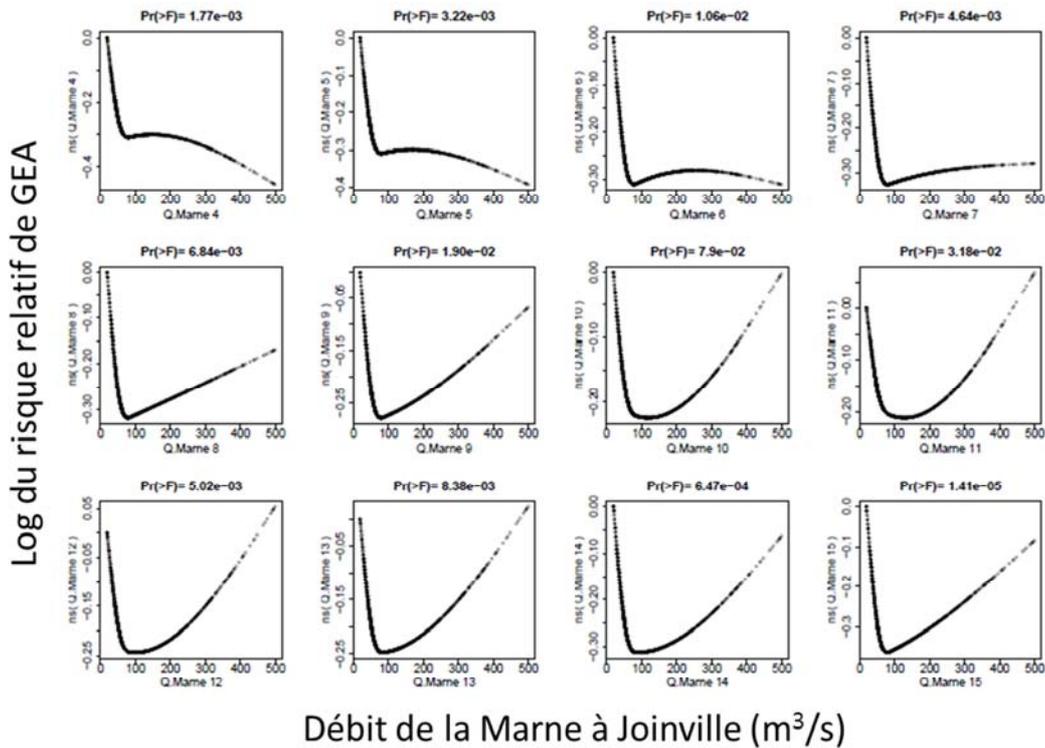


#### 4.4.4 Relation entre l'incidence des GEAM et les débits des ressources

##### 4.4.4.1 Débit de la Marne

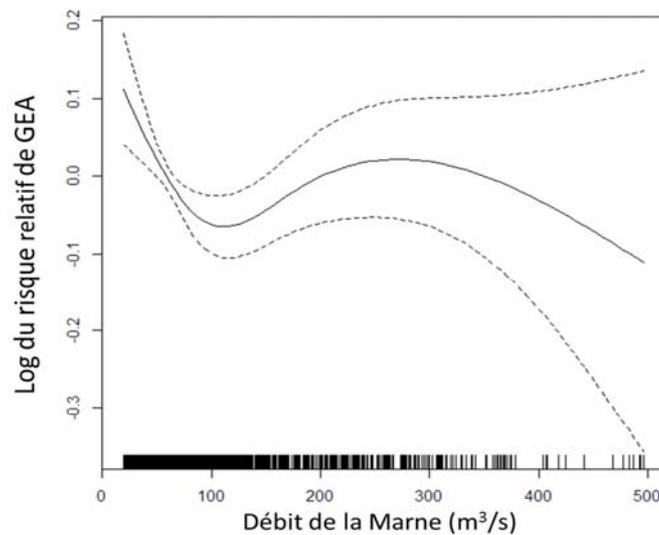
La relation entre le débit de la Marne et l'incidence des GEAM est stable (figure 23) sur la partie correspondant aux débits inférieurs au débit médian (63 m<sup>3</sup>/s). Au-delà de ce débit, la relation varie selon le *lag* considéré (croissante à partir du *lag* 7). Toutes les associations sont significatives. La forme des relations n'est pas modifiée par la suppression des valeurs de débit supérieures au percentile 98.

**Figure 23 : Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction du débit de la Marne, pour des latences de l'effet comprises entre 4 et 15 jours (2002-2007).**



La modélisation à partir d'une variable moyennée sur les latences 6 à 8 confirme ces résultats et met en évidence une relation en forme de « U » avec un minimum pour un débit de 100 m³/s (figure 24). L'association est significative ( $p=0,008$ ).

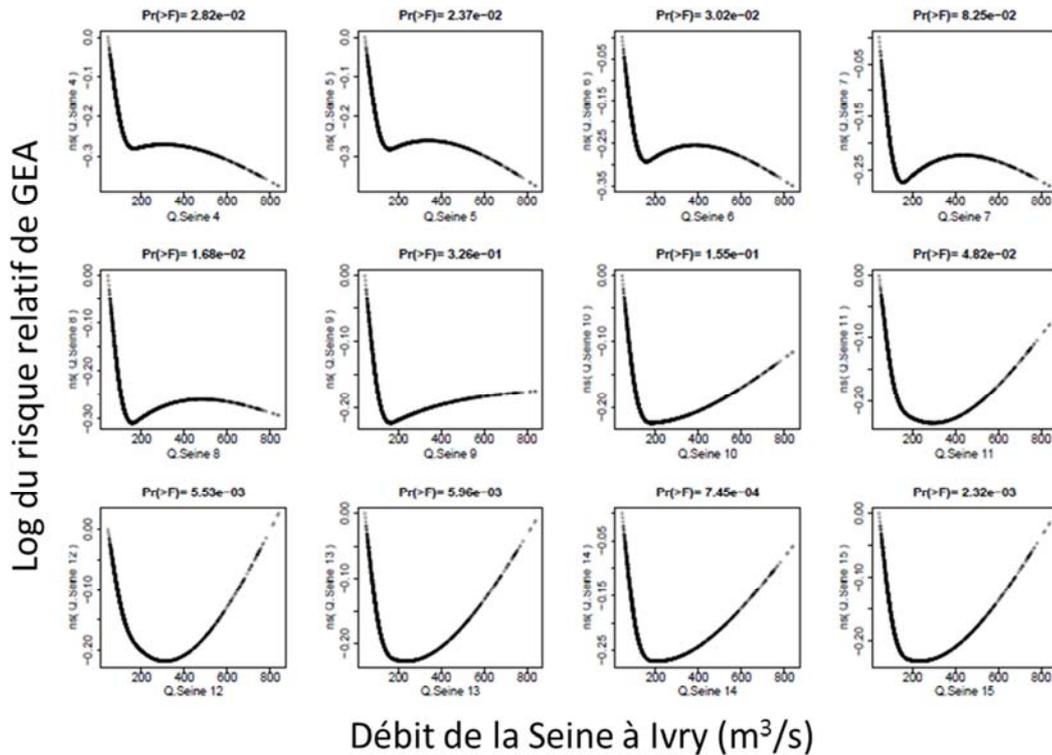
**Figure 24 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction du débit de la Marne, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**



#### 4.4.4.2 Débit de la Seine

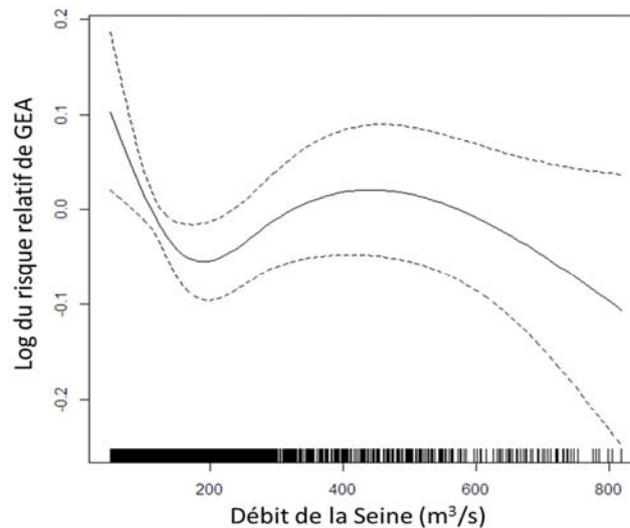
La relation entre le débit de la Seine et l'incidence des GEAm est stable et décroissante pour les valeurs de débit inférieures au percentile 50 (128 m<sup>3</sup>/s). Pour les débits élevés, la relation a tendance à se stabiliser vers une relation croissante à partir du *lag* 9 (figure 25). Les associations sont significatives, exceptées aux *lags* 9 et 10. La suppression des valeurs de débit supérieures au percentile 98 modifie la forme de la relation pour certains *lags*, sur la partie concernant les plus forts débits.

**Figure 25 : Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction du débit de la Seine, pour des latences de l'effet comprises entre 4 et 15 jours (2002-2007).**



La modélisation à partir d'une variable moyennée sur les latences 6 à 8 confirme ces résultats et met en évidence une relation en forme de « U » avec un minimum pour un débit de 200 m<sup>3</sup>/s (figure 26). L'association est significative (p=0,025).

**Figure 26 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction du débit de la Seine, avec une latence de l'effet de 6-8 jours (2002-2007).**



#### **4.4.5 Relation entre l'incidence des GEAm et la température du mélange d'eaux produites**

La relation entre la température moyenne du mélange d'eau et l'incidence des GEAm est conservée sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 27). Elle présente une forme en « U » avec un minimum compris entre 10 et 15 °C, proche de la température médiane du mélange. Les associations sont significatives à partir du *lag* 7. Les relations ne sont pas modifiées par la suppression des valeurs de température supérieures au percentile 98.

### **4.5 Modélisation multi-exposition**

#### **4.5.1 Construction du modèle multi-exposition**

Les variables d'exposition incluses dans le modèle final ont été choisies sur la base des résultats obtenus à partir des modélisations mono-exposition.

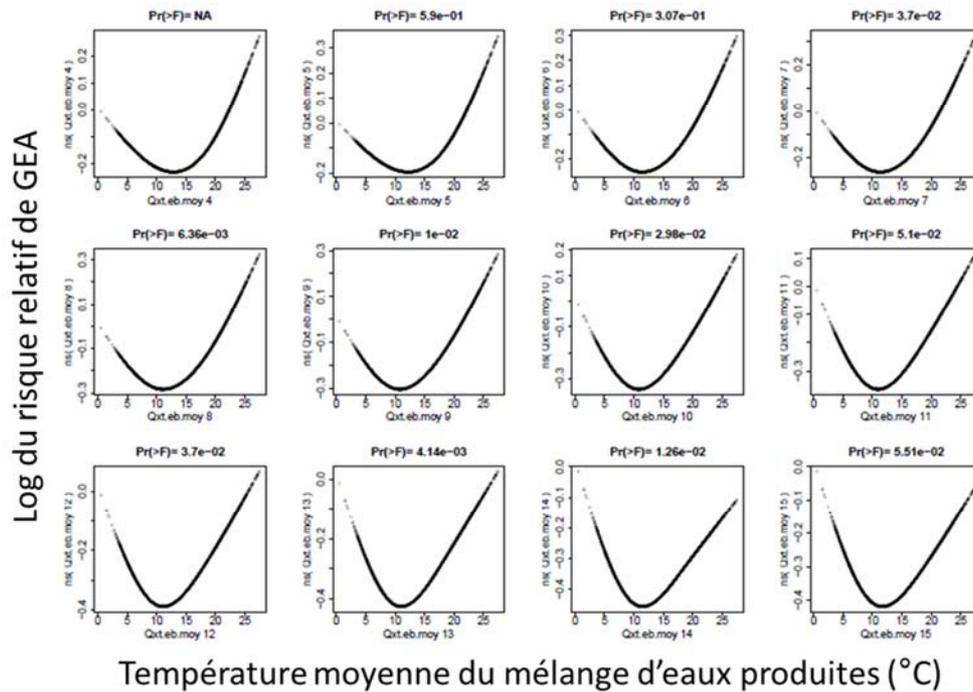
La turbidité moyenne du mélange d'eau a été retenue dans le modèle final car elle représente le mieux l'exposition liée à l'eau mise en distribution.

Les débits des ressources ont montré des résultats significatifs et dont la forme des relations apparaît stable sur plusieurs *lags* successifs. Ces deux variables étant très corrélées ( $r=0,91$ ), seul le débit de la Seine a été introduit dans le modèle.

La température de l'air habituellement incluse a été remplacée par la température de l'eau, non disponible dans les précédents volets de l'étude. Du fait d'un lien vraisemblable à l'exposition d'origine hydrique, elle a été introduite sous la forme d'une moyenne des *lags* 6 à 8.

Conformément aux conclusions des précédents volets de l'étude Turbidité & Gastro-entérites (Nantes, Angoulême et Paris-Centre), le débit total produit a également été inclus dans le modèle. Toutefois, le nombre important de données manquantes sur cette variable (12,16 %) nous a conduits à tester également des modèles excluant cette variable.

**Figure 27 : Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction de la température moyenne de l'eau des ressources, pour des latences de l'effet comprises entre 4 et 15 jours (2002-2007).**

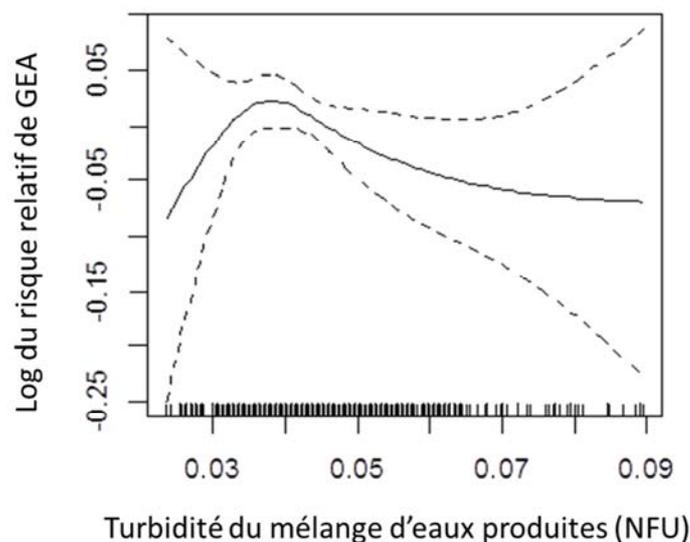


## 4.5.2 Modélisation chez les enfants

### 4.5.2.1 Modélisation incluant le débit total produit

L'association entre la turbidité et l'incidence des GEAm n'est pas significative ( $p=0,3$ ). La largeur de l'intervalle de confiance de la relation ne permet pas de conclure sur la forme de la relation entre ces deux variables (figure 28).

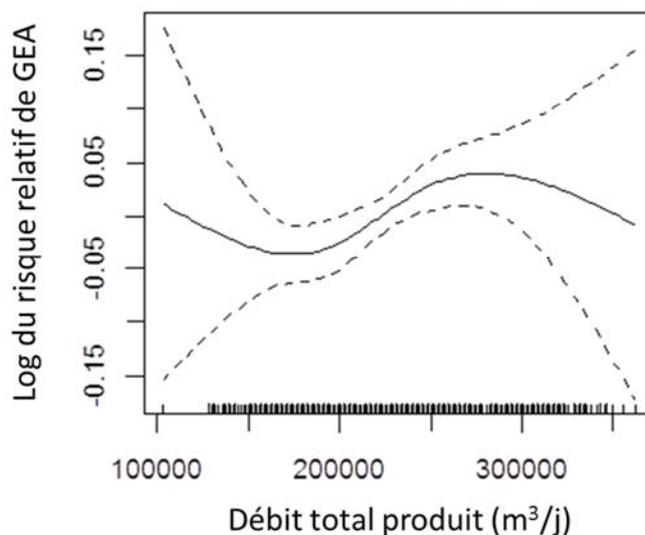
**Figure 28 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction du niveau moyen de turbidité du mélange des eaux produites, avec une latence de l'effet de 6-8 jours, modélisation multi-exposition avec inclusion du débit total produit (2002-2007).**



La forme de la relation entre le débit total produit et l'incidence des GEAm est croissante (figure 29) sur une plage de débit compris entre 180 000 m<sup>3</sup>/j (percentile 25) et 270 000 m<sup>3</sup>/j (proche du

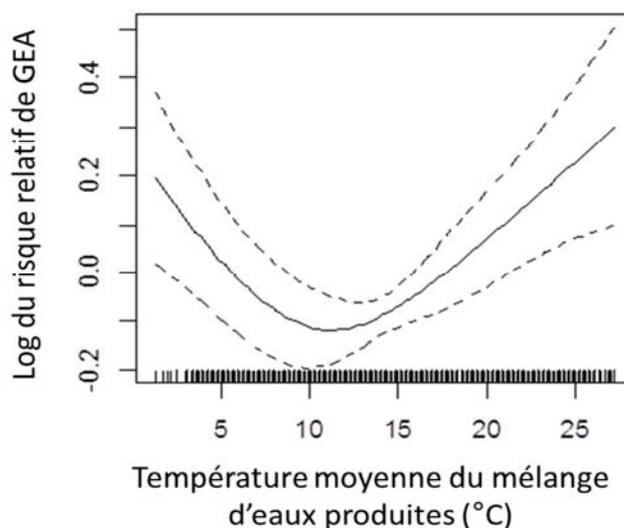
percentile 75). Elle n'est pas modifiée dans le modèle multi-exposition par rapport aux résultats obtenus en mono-exposition. L'association n'est pas significative ( $p=0,06$ ). Pour une augmentation interquartile du débit, entre 180 000 et 256 000  $m^3/j$ , le risque de GEAm est de 1,047,  $IC_{95\%} = [1,01-1,087]$ .

**Figure 29 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction du débit total produit par les usines de Joinville-le-Pont et Ivry-sur-Seine, avec une latence de l'effet de 6-8 jours, modélisation multi-exposition (2002-2007).**



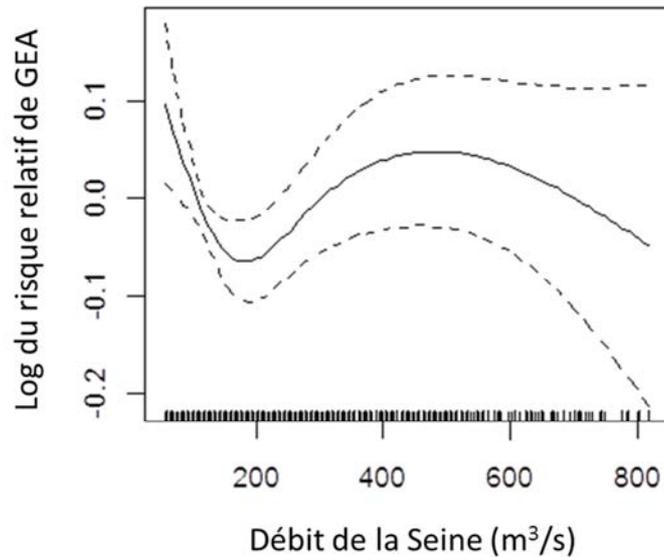
La relation entre la température moyenne du mélange d'eaux produites et l'incidence des GEAm est en forme de « U » avec un minimum observé pour une température comprise entre 10 et 12  $^{\circ}C$  (figure 30). L'association est très significative ( $p < 1,2 \cdot 10^{-5}$ ).

**Figure 30 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction de la température moyenne du mélange d'eaux produites par les usines de Joinville-le-Pont et d'Ivry-sur-Seine, avec une latence de l'effet de 6-8 jours, modélisation multi-exposition (2002-2007).**



La forme de la relation entre le débit de la Seine et l'incidence des GEAm (figure 31) est conforme aux résultats obtenus en mono-exposition. L'association est significative ( $p=0,01$ ).

**Figure 31 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction du débit de la Seine, avec une latence de l'effet de 6-8 jours, modélisation multi-exposition (2002-2007).**



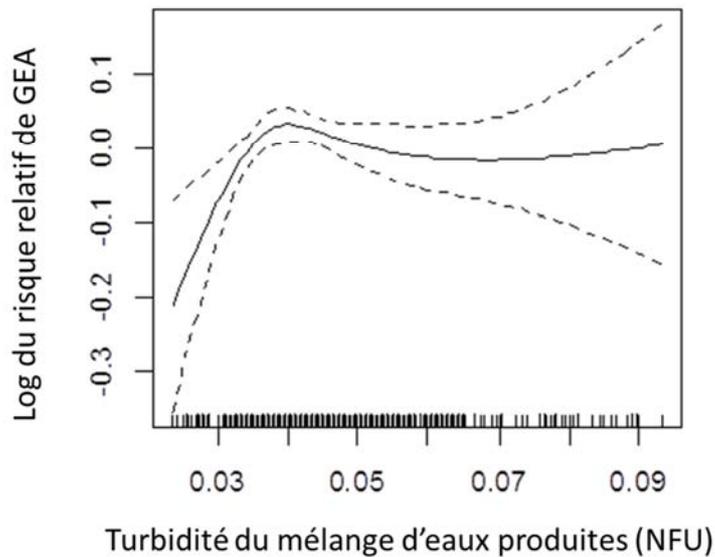
Afin d'évaluer si le débit de la Seine (traduisant le débit des ressources, compte tenu de la corrélation entre les débits des deux rivières) modifie l'effet de la turbidité du mélange d'eaux produites, nous avons introduit ces deux variables sous la forme d'une interaction (variable à deux dimensions). Cette manipulation montre que les crues renforcent le risque de GEAm associé à la turbidité (non montré). L'effet de l'interaction n'est toutefois pas significatif ( $p=0,36$ ).

#### 4.5.2.2 Modélisation excluant le débit total produit

La prise en compte du débit total produit dans le modèle multi-exposition supprime la significativité de l'association entre turbidité et incidence des GEAm (passage de  $p=0,015$  en mono-exposition à  $p>0,2$  en multi-exposition). Le nombre important de données manquantes sur la variable débit total produit (12,16 %) est probablement l'explication. Une seconde modélisation multi-exposition a donc été réalisée à partir du modèle ci-dessus en excluant la variable « débit total produit ».

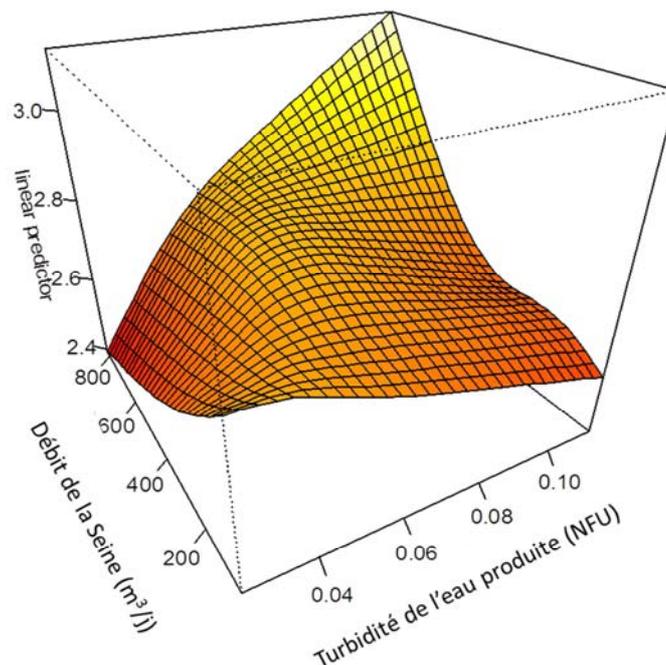
Dans ce second modèle, l'effet de la turbidité sur l'incidence des GEAm est significatif ( $p=0,02$ ). La forme de la relation est croissante entre 0,02 et 0,04 NFU (figure 32). Entre 0,03 et 0,04 NFU, l'augmentation du risque de GEAm est de l'ordre de 10 %. Au-delà de 0,04 NFU, le sens de la relation ne se poursuit pas et il n'est pas possible de conclure.

**Figure 32 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction du niveau moyen de turbidité du mélange des eaux produites, avec une latence de l'effet de 6-8 jours, modélisation multi-exposition sans inclusion du débit total produit (2002-2007).**



La prise en compte du débit de la Seine et de la turbidité de l'eau produite sous la forme d'une interaction (variable à deux dimensions) met en évidence une association significative avec le risque de GEAm ( $p=0,046$ ). La forme de la relation montre un effet modificateur du débit de la Seine sur le risque de GEAm porté par la turbidité (figure 33), notamment une accentuation du risque aux très forts débits de la Seine. Aux débits moyens la relation turbidité-risque prend la forme « moyenne », puis tend à décroître en étiage.

**Figure 33 : Modulation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité du mélange d'eaux produites par les usines de Joinville et Ivry et le débit de la Seine, avec une latence de 6-8 jours (2002-2007).**



#### 4.5.2.3 Effet de la clarification mise en œuvre à Joinville-le-Pont

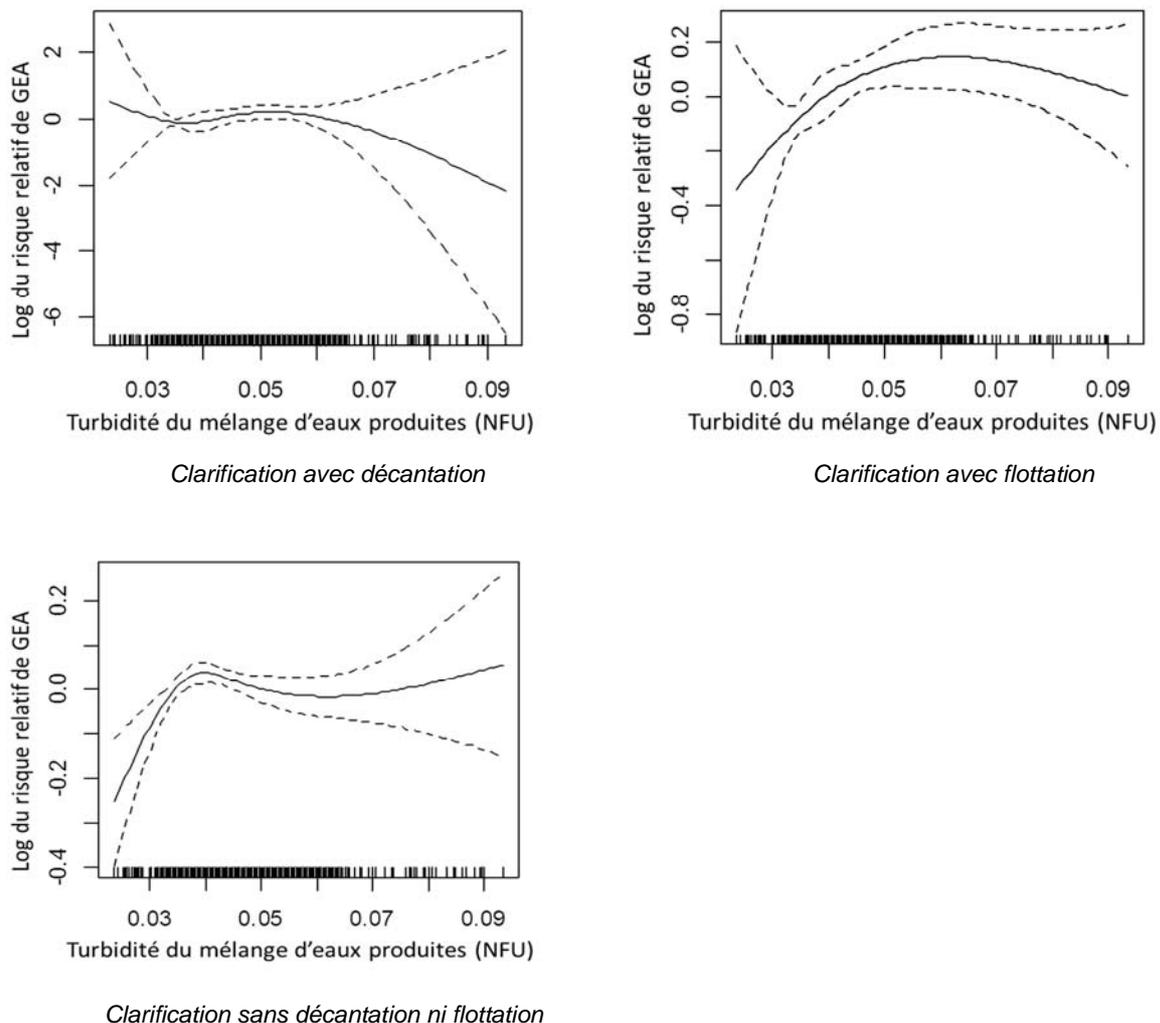
Dans l'usine de Joinville, la clarification est adaptée selon les besoins de l'exploitant. Nous avons choisi d'approfondir l'étude de la relation entre la turbidité du mélange d'eau (Ivry + Joinville) et l'incidence des GEAm selon les trois modalités de fonctionnement de l'usine de Joinville :

- clarification simple, sans décantation ni flottation (1 783 jours, 88,8 % de la période d'étude) ;
- avec flottation (169 jours, soit 8,4 % de la période d'étude) ;
- avec décantation (55 jours, soit 2,7 % de la période d'étude).

Une variable qualitative « clarification » a été construite à partir des informations fournies par l'exploitant sur les dates de mises en œuvre des différents modes de clarification. Cette variable reflète les trois modes de fonctionnement de la clarification dans l'usine de Joinville. Elle a d'abord été introduite dans le modèle multi-exposition sans la variable débit total produit, sous la forme d'une interaction avec la turbidité du mélange d'eau.

En l'absence de clarification, la relation entre la turbidité moyenne de l'eau du mélange et l'incidence des GEAm est inchangée par rapport aux précédents résultats (figure 34).

**Figure 34 : Variation du risque de GEAm (log) chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité du mélange d'eau produite par les usines de Joinville et Ivry, selon le mode de clarification utilisé à Joinville-le-Pont, avec une latence de l'effet de 6-8 jours, modélisation multi-exposition (2002-2007).**



L'association reste significative ( $p=0,005$ ). Durant les périodes de décantation ou de flottation, la forme de la relation est modifiée. Elle est plane lorsque la décantation est opérationnelle (association non significative ;  $p=0,2$ ) ou croissante lorsque c'est la flottation qui est opérationnelle (association significative ;  $p<0,03$ ).

L'ajout de la variable débit total produit dans ce modèle multi-exposition ne modifie pas la forme des relations entre turbidité et incidence des GEAm mais supprime la significativité de toutes les associations entre turbidité et incidence des GEAm. La forme de la relation entre le débit total produit et l'incidence des GEAm n'est pas modifiée par rapport aux précédents résultats obtenus avec cette variable (figure 34). L'association est significative ( $p=0,047$ ).

#### 4.5.2.4 Modèle retenu

Lors de la modélisation multi-exposition, la significativité de l'association entre la turbidité du mélange d'eaux produites et l'incidence des GEAm est dégradée par la prise en compte de la variable débit total produit.

L'ajout d'une interaction entre turbidité et type de clarification opérée à Joinville n'apporte rien à la modélisation par rapport à la prise en compte de la turbidité seule.

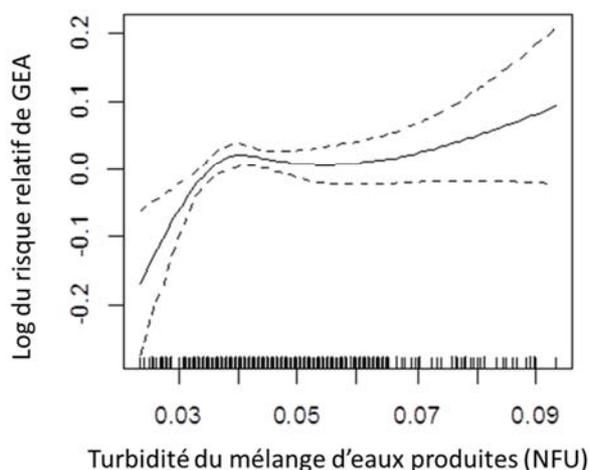
De ce fait, seules les variables température pondérée de l'eau produite, débit de la Seine et turbidité du mélange d'eaux produites sont retenues pour l'étape de validation du modèle chez les adultes.

### 4.5.3 Validation du modèle chez les adultes

Dans le but de valider les résultats obtenus chez les moins de 16 ans, le modèle retenu pour les enfants a été reproduit sur les adultes (mêmes variables, même paramétrage, excepté le lissage de la tendance).

La forme de la relation entre la turbidité pondérée et l'incidence des GEAm chez les plus de 15 ans est croissante entre 0,02 et 0,04 NFU (figure 35), conformément aux résultats obtenus chez les moins de 15 ans. L'association est fortement significative ( $p=0,009$ ).

**Figure 35 : variation du risque de GEAm (log) chez les plus de 15 ans en fonction du niveau moyen de turbidité du mélange des eaux produites, avec une latence de l'effet de 6-8 jours, modélisation multi-exposition sans inclusion du débit total produit (2002-2007).**

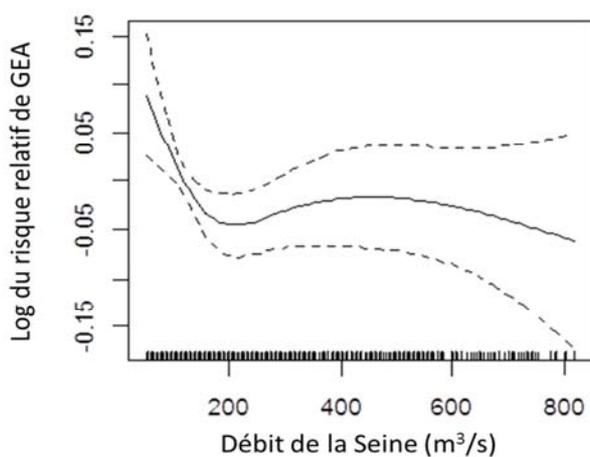


L'augmentation du risque de GEAm est d'environ 10 % pour une variation de la turbidité entre 0,03 et 0,04 NFU, soit du même ordre de grandeur que celle observée chez les moins de 16 ans. Au-delà de 0,04 NFU, la relation montre une tendance croissante (figure 35).

La forme de la relation entre le débit de la Seine et l'incidence des GEAm est similaire à celle observée lors de la modélisation chez les moins de 16 ans (figure 36). La relation est d'abord décroissante jusqu'à 200 m<sup>3</sup>/s puis atteint un plateau au-delà. L'association est significative (p=0,03).

Si la variable débit total sortant est ajoutée dans le modèle multi-exposition utilisé, l'association entre la turbidité des eaux produites et l'incidence des GEAm chez les plus de 15 ans perd sa significativité, de la même manière que lors de la modélisation chez les enfants.

**Figure 36 : Variation du risque de GEAm (log) chez les plus de 15 ans en fonction du débit de la Seine, avec une latence de l'effet de 6-8 jours, modélisation multi-exposition sans inclusion du débit total (2002-2007).**



## 5. Discussion

Ce nouveau volet de l'étude turbidité & gastro-entérites est le cinquième de la série. Les discussions précédentes traitaient de la qualité des données sanitaires utilisées [7;8] et des méthodes statistiques mises en œuvre [8]. Il n'apparaît pas utile de les répéter ici.

Les résultats obtenus sur le site de Paris-Est sont cohérents avec ceux obtenus à Nantes [8]. Ces deux sites ont en commun de prélever de l'eau de rivière et de bénéficier d'un traitement complet. Les principales différences sont l'existence de deux ressources et la mise en œuvre d'une filtration lente sur le site parisien. Les modèles de risque font ressortir la turbidité des eaux produites et le débit de la Seine (ou des ressources en général) comme variables d'intérêt, avec des fonctions de risque cohérentes, croissantes en partie pour la turbidité et en « U » pour le débit de la Seine. L'effet modificateur du débit des ressources sur le risque lié à la turbidité des eaux produites prend la même forme qu'à Nantes : la turbidité est un indicateur du risque de GEAm en période de hautes eaux mais pas en période de basses eaux. Aux débits moyens des ressources, la relation turbidité-risque n'est croissante qu'aux faibles valeurs de turbidité.

Du fait de la coexistence de deux sites de production d'eau, deux variables exprimaient le niveau de turbidité des eaux produites mesuré en sortie d'usine. Une troisième variable exprimant la turbidité du mélange de ces eaux a été construite comme la moyenne des turbidités des eaux de chaque usine, pondérées par le débit produit. Au plan physico-chimique, cette construction est valable car les turbidités sont additives dans cette gamme de mesure et les propriétés physico-chimiques similaires des deux eaux préviennent les phénomènes de précipitation ou de désagrégation des particules, qui perturberaient la turbidité lors du mélange. Sur le plan biologique, les eaux sont des eaux de rivières polluées par des contaminations fécales. Les résultats obtenus à partir des turbidités par usine n'ont pas été concluants. En revanche, la variable exprimant le niveau de turbidité du mélange d'eau montrait des résultats conformes aux attentes, comme sur le site de Paris-Centre. La forte significativité de l'association, sa stabilité sur plusieurs *lags* et sa forme croissante sur la partie comprise entre 0,02 et 0,04 NFU, zone la plus dense en mesures, sont des arguments en faveur de la réalité du risque. Cette relation, mise en évidence chez les moins de 16 ans, est retrouvée chez les adultes, avec une augmentation du risque de GEAm du même ordre de grandeur pour une augmentation de la turbidité entre 0,03 et 0,04 NFU.

Les données sont insuffisantes pour mettre en évidence un effet modificateur significatif de l'option de clarification mise en œuvre à Joinville (à Ivry le mode de clarification ne change pas) sur le risque associé à la turbidité du mélange.

La prise en compte du débit total produit dans la modélisation du risque rend la relation entre GEAm et turbidité non significative. Cette variable contient de nombreuses données manquantes et il est probable que ces valeurs, soient nécessaires à la mise en évidence d'un risque significatif lié à la turbidité en permettant un ajustement correct du modèle.

## 6. Conclusion

Les résultats de ce volet de l'étude Turbidité & Gastro-entérites viennent confirmer les précédents résultats mettant en évidence une augmentation du risque de GEAm liée à une hausse de la turbidité moyenne dans l'eau mise en distribution (Philadelphie [15], Vancouver [16], Le Havre [7], Nantes [8], Boston [17], Paris Centre [10]). L'excès de risque de GEAm associé à la turbidité est comparable à la plupart de ceux déjà mis en évidence dans ces sites.

Ce nouveau résultat plaide en faveur de l'utilisation de la turbidité en tant que *proxy* d'exposition du risque de GEA d'origine hydrique. L'association trouvée reste cependant très dépendante de la représentativité du *proxy* utilisé vis-à-vis de l'exposition de la population étudiée, ainsi que de la qualité des autres covariables d'exposition utilisées pour modéliser le risque. Dans le cas présent, l'association avec l'incidence des GEAm apparaît pour la turbidité du mélange d'eaux produites mais pas pour les turbidités respectives de chacune des usines de production, ce qui correspond à la situation déjà observée sur le site de Paris-Centre.

## 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] Beaudeau 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 gastroenteritis incidence from French health insurance databases]. *Pratiques et Organisation des Soins* 2006;37(4):313-23.
- [3] Bounoure F, Beaudeau P, Mouly D, Skiba M, Lahiani-Skiba M. Syndromic Surveillance of Acute Gastro-Enteritis Based on Drug Consumption, France. *Epidemiol Infect* 2010.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Sinclair MI, Fairley CK. Drinking water and endemic gastrointestinal illness. *J Epidemiol Community Health* 2000;54(10):728.
- [7] Beaudeau 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 gastroentérites, 1997-2000 : une étude écologique temporelle. Saint-Maurice, France: Institut de veille sanitaire; 2010. 42 p.
- [8] Beaudeau P, Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M. Qualité de l'eau distribuée à Nantes et incidence des gastro-entérites aiguës. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire; 2012. 47 p.
- [9] Beaudeau 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.
- [10] Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M, Beaudeau P. Qualité de l'eau distribuée à Paris-Centre et incidence des gastro-entérites aiguës, 2002-2007. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire; 2013.
- [11] Welte B, Montiel A. Étude comparative de mesure de la turbidité sur différentes eaux. 2000.
- [12] Beaudeau P, Mouly D, Lauzeille D. Détection précoce automatisée des épidémies de gastro-entérites d'origine hydrique à partir des données de vente ou de remboursement des médicaments. Etude de faisabilité: Choix des données sanitaires et des départements pilotes. Rapport. Saint-Maurice: 2006. 34 p.
- [13] 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).
- [14] Haas CN, Rose JB, Gerba CP. Quantitative microbial risk assessment. New York : John Wiley & Sons; 1999. 449 p.
- [15] Schwartz J, Levin R, Hodge K. Drinking water turbidity and pediatric hospital use for gastrointestinal illness in Philadelphia. *Epidemiology* 1997;8(6):615-20.
- [16] Aramini J, McLean M, Wilson J, Holt J, Copes R, Allen B, *et al.* Drinking water quality and health-care utilization for gastrointestinal illness in greater Vancouver. *Can Commun Dis Rep* 2000;26(24):211-4.
- [17] Beaudeau P. Surveillance syndromique des gastroentérites aiguës : une opportunité pour la prévention du risque infectieux attribuable à l'ingestion d'eau du robinet. Thèse de Doctorat. Université de Rennes 1; 2012. 239 p.

# Annexe – script R et paramètres du modèle multi-exposition utilisé chez les cas de GEAm enfants

```
mod.fit=gam(spell14~s(trend,k=100,bs="cr",fx=FALSE)+dowf+j.feries+ete+fevrie
r+noel+paques+toussaint+s(Qxt.eb.moy68,bs="cr",fx=TRUE,k=4)+s(QXTuET.moymoy
68,bs="cr",fx=TRUE,k=4)+s(Q.Seine.moy68,bs="cr",fx=TRUE,k=4),family=quasipo
isson,data=ParisEst,na.action=na.omit,sp=500,subset=trend>31)
```

**Family:** quasipoisson  
**Link function:** log

**Formula:**  
spell14 ~ s(trend, k = 100, bs = "cr", fx = FALSE) + dowf + j.feries + ete + fevrier + noel + paques + toussaint + s(Qxt.eb.moy68, bs = "cr", fx = TRUE, k = 4) + s(QXTuET.moymoy68, bs = "cr", fx = TRUE, k = 4) + s(Q.Seine.moy68, bs = "cr", fx = TRUE, k = 4)

## Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	Signif
(Intercept)	1.52945	0.03912	39.099	< 2e-16	***
dowfjeudi	1.40066	0.04280	32.729	< 2e-16	***
dowflundi	1.68733	0.04167	40.497	< 2e-16	***
dowfmardi	1.40768	0.04255	33.081	< 2e-16	***
dowfmercredi	1.28738	0.04319	29.806	< 2e-16	***
dowfsamedi	0.65865	0.04698	14.020	< 2e-16	***
dowfvendredi	1.32802	0.04304	30.852	< 2e-16	***
j.feries	-1.52103	0.09912	-15.346	< 2e-16	***
ete	-0.42671	0.04479	-9.527	< 2e-16	***
fevrier	-0.46601	0.05261	-8.857	< 2e-16	***
noel	-0.46127	0.04541	-10.157	< 2e-16	***
paques	-0.31251	0.05678	-5.504	4.26e-08	***
toussaint	-0.22416	0.06350	-3.530	0.000426	***

## Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value	Signif
s(trend)	33.4	41.66	12.000	< 2e-16	***
s(Qxt.eb.moy68)	3.0	3.00	12.408	4.95e-08	***
s(QXTuET.moymoy68)	3.0	3.00	3.111	0.0254	*
s(Q.Seine.moy68)	3.0	3.00	3.169	0.0235	*

R-sq.(adj) = 0.778    Deviance explained = 77.5 %  
GCV score = 1.6542    Scale est. = 1.604    n = 1825

**Signif. codes:** '\*\*\*\*' < 0.001  
'\*\*\*' < 0.01  
'\*\*' < 0.05  
'.' < 0.1  
' ' < 1

## Qualité de l'eau distribuée à Paris-Est et incidence des gastro-entérites aiguës (GEA)

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 (GEA) observés sur la zone desservie. Ce volet de l'étude concerne deux arrondissements parisiens (19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup>), alimentés par un mélange d'eau provenant des usines d'Ivry-sur-Seine (pompage en Seine) et de Joinville-le-Pont (pompage en Marne). Les traitements mettent en œuvre une filtration lente sur sable.

L'incidence des GEA était obtenue à partir des données de l'Assurance maladie entre 2002 et 2007. La méthode a consisté à régresser, par un modèle additif généralisé, l'incidence des GEA sur les niveaux quotidiens de turbidité des eaux mises en distribution. Dans une seconde étape, plusieurs paramètres d'exploitation des usines ou facteurs météorologiques ont été testés comme facteurs de risque des GEA.

Les résultats montrent qu'une dégradation de la turbidité de l'eau distribuée est liée à une augmentation du risque de GEA chez les enfants (1-15 ans) et les adultes (16 ans et +). Le débit des ressources influence fortement la relation entre turbidité et risque de GEA puisque cette dernière n'est valable qu'en période de hautes eaux et pas en période de basses eaux.

Le type de traitement optionnel mis en œuvre dans l'usine de Joinville-le-Pont (décantation ou flottation) n'a pas d'influence significative sur le risque de GEA.

**Mots clés :** eau, turbidité, gastro-entérites, assurance maladie, séries temporelles, Paris

## Quality of water distributed in East of Paris 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 part of the report concern two districts of Paris supplied with a mix of waters coming from two water treatment plants (Ivry-sur-Seine and Joinville-le-Pont). Water is pumped from both Seine and Marne rivers. The main part of the treatment is done through a slow sand filtration.*

*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 conditions or meteorological parameters of the plant were tested as risk factors for AGE.*

*The results show that slight turbidity degradation is connected to an increase in the risk of AGE for children (under 16) or adults of the concerned area. The Seine river flow has a strong influence on the relation between turbidity and AGE risk as there's no reliable relation during low water period.*

*The optional water treatment in Joinville-le-Pont's plant (settling or floatation) has no significant impact on the endemic level of AGE.*

Citation suggérée :

Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M, Beaudeau P. Qualité de l'eau distribuée à Paris-Est et incidence des gastro-entérites aiguës (GEA), 2002-2007. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire ; 2014. 46 p. Disponible à partir de l'URL : <http://www.invs.sante.fr>