

*Santé environnement*

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

2002-2007

Loïc Rambaud, Abdelkrim Zeghnoun, Magali Corso, Pascal Beaudeau

# Sommaire

|                                                         |           |                                                          |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| Abréviations                                            | 2         | 4.4 Recherche d'autres facteurs de risque des GEAm       | 21        |
| <b>1. Introduction</b>                                  | <b>3</b>  | 4.4.1 Température de l'eau brute                         | 22        |
| <b>2. Objectifs de l'étude</b>                          | <b>5</b>  | 4.4.2 Débit de la Moselle                                | 23        |
| <b>3. Matériels et méthodes</b>                         | <b>6</b>  | 4.4.3 Turbidité de l'eau brute                           | 24        |
| 3.1 Secteur d'étude                                     | 6         | 4.4.4 Turbidité de l'eau brute préchlorée                | 25        |
| 3.2 Données et variables                                | 8         | 4.4.5 Débit total produit                                | 26        |
| 3.2.1 Données environnementales                         | 8         | 4.4.6 Proportion de débit produit par l'usine E. Imbeaux | 27        |
| 3.2.2 Données sanitaires                                | 10        | 4.4.7 Turbidité de l'eau traitée                         | 28        |
| 3.3 Le modèle statistique                               | 11        | 4.4.8 Nombre de coupures d'eau sur le réseau             | 29        |
| 3.4 Étude du rôle de la turbidité                       | 11        | 4.4.9 Nombre d'interventions sur le réseau               | 30        |
| 3.4.1 Définition du <i>proxy</i> d'exposition utilisé   | 11        | 4.5 Modélisation multi-exposition                        | 31        |
| 3.4.2 Latence et décalage de l'exposition               | 12        | 4.5.1 Construction du modèle                             | 31        |
| 3.5 Recherche d'autres facteurs de risque               | 12        | 4.5.2 Modélisation chez les enfants                      | 32        |
| 3.5.1 Analyses mono-exposition                          | 12        | 4.5.3 Test du modèle chez les adultes                    | 32        |
| 3.5.2 Analyses multi-exposition                         | 13        | <b>5. Discussion</b>                                     | <b>35</b> |
| <b>4. Résultats</b>                                     | <b>14</b> | 5.1 Débit de la ressource                                | 35        |
| 4.1 Qualité des données                                 | 14        | 5.2 Débit produit                                        | 35        |
| 4.2 Distribution des variables                          | 15        | 5.3 Turbidité et température de l'eau traitée            | 35        |
| 4.2.1 Incidence des GEAm                                | 15        | 5.4 Bilan sur les sites alimentés par une eau de rivière | 36        |
| 4.2.2 Températures                                      | 15        | <b>6. Conclusion</b>                                     | <b>38</b> |
| 4.2.3 Paramètres de qualité de l'eau brute              | 16        | Références bibliographiques                              | 39        |
| 4.2.4 Paramètres de qualité de l'eau traitée            | 17        | Annexes                                                  | 40        |
| 4.2.5 Gestion du réseau de distribution                 | 18        |                                                          |           |
| 4.2.6 Corrélation entre covariables                     | 19        |                                                          |           |
| 4.3 Relation entre la turbidité et l'incidence des GEAm | 20        |                                                          |           |

# Qualité de l'eau distribuée à Nancy et incidence des gastro-entérites aiguës

2002-2007

## Auteurs

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

Abdelkrim Zeghnoun (modélisation statistique), InVS

Magali Corso (préparation des données), InVS

Pascal Beaudeau (direction), InVS

## Comité technique

Frédéric Bounoure (université de Rouen), Boris David (Veolia eau), Henriette De Valk (InVS), Jean Duchemin (Agence de l'eau Seine-Normandie), Matthieu Fournier (université de Rouen), Catherine Galey (InVS), Alain Le Tertre (InVS), Jean-François Loret (Suez environnement), Sylvie Thiebert (Syndicat des eaux d'Ile-de-France, Sedif), 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 Communauté urbaine du grand Nancy (CUGN) et la Société nancéienne des eaux (SNE) pour la fourniture des données d'exploitation et Météo-France pour la fourniture des données météorologiques. Ils remercient également Christine Meffre de la Cellule de l'InVS en région (Cire) Lorraine-Alsace pour la relecture de ce rapport.

# Abréviations

|                  |                                                                    |
|------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>CAG</b>       | Charbon actif en grain                                             |
| <b>Cire</b>      | Cellule de l'InVS en région                                        |
| <b>CUGN</b>      | Communauté urbaine du grand Nancy                                  |
| <b>EB</b>        | Eaux brutes                                                        |
| <b>EB-PC</b>     | Eaux brutes préchlorées                                            |
| <b>ET</b>        | Eaux traitées                                                      |
| <b>Erasme</b>    | Extraction, recherche et analyses pour un suivi médico-économique  |
| <b>GAM</b>       | Generalized Additive Model                                         |
| <b>GCV</b>       | Generalized Cross-Validation                                       |
| <b>GEA</b>       | Gastro-entérite aiguë                                              |
| <b>GEAm</b>      | Gastro-entérite aiguë médicalisée                                  |
| <b>Insee</b>     | Institut national de la statistique et des études économiques      |
| <b>InVS</b>      | Institut de veille sanitaire                                       |
| <b>MES</b>       | Matières en suspension                                             |
| <b>NTU</b>       | Nephelometric Turbidity Unit                                       |
| <b>Sedif</b>     | Syndicat des eaux d'Ile-de-France                                  |
| <b>SISE-Eaux</b> | Système d'information en santé environnement – Eaux                |
| <b>SNE</b>       | Société nancéienne des eaux                                        |
| <b>Spe115</b>    | Nombre quotidien de cas de GEAm chez les enfants entre 1 et 15 ans |
| <b>Spe16+</b>    | Nombre quotidien de cas de GEAm chez les adultes de 16 ans et plus |

# 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 et leurs manifestations généralement bénignes. Les améliorations réalisées en matière de protection des ressources, de potabilisation de l'eau ou encore d'assainissement ont largement contribué à ce progrès sanitaire.

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

Les personnes responsables de la production d'eau potable sont tenues par le code de la santé publique de fournir une eau propre à la consommation humaine et donc exempte d'agents pathogènes (articles L1321-1 et suivants du code de la santé publique). La plupart des filières de traitement de l'eau n'ont cependant pas les capacités techniques de produire une eau totalement exempte de micro-organismes pathogènes. Les matières en suspension (MES), si elles ne sont pas éliminées avant la mise en distribution de l'eau, peuvent jouer le rôle de refuge pour certains micro-organismes et leur permettre de résister aux désinfections successives. De plus, les matières organiques, dont la présence est souvent associée aux MES, peuvent consommer prématurément le résiduel de désinfectant injecté dans les réseaux et contribuer ainsi à augmenter la probabilité de survie des micro-organismes. Le niveau de turbidité de l'eau mise en distribution, qui reflète la présence de MES, pourrait ainsi s'avérer être un bon estimateur de l'exposition des consommateurs d'eau au risque infectieux et un bon indicateur du risque de gastro-entérites aiguë (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 épisode par personne et par an [1]. Après l'infection, ces symptômes se déclarent généralement avec une latence comprise entre un à dix jours. La sensibilité et la réactivité sont des qualités importantes qui font de la GEA un syndrome adéquat pour la surveillance épidémiologique des épidémies infectieuses d'origine hydrique. En France, les données de remboursement de médicaments prescrits pour le traitement d'une GEA permettent la construction d'un indicateur de l'incidence des GEA qui présente les qualités attendues pour l'épidémiologie des infections d'origine fécale et particulièrement pour l'étude d'un facteur de risque local tel que la consommation d'eau [2].

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

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

## 2. Objectifs de l'étude

L'étude turbidité et gastro-entérites est une étude multicentrique incluant onze villes ou agglomérations françaises. Le présent volet de cette étude se concentre sur l'eau produite par la Société nancéienne des eaux (SNE) sur les communes de la communauté urbaine du grand Nancy (CUGN), *via* les usines Saint-Charles et Edouard Imbeaux. Le service d'eau de la communauté urbaine du Grand Nancy est géré en régie depuis 1959. La gestion des usines de production d'eau est confiée

à la SNE depuis 1973.

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

- étudier la relation entre la turbidité de l'eau mise en distribution et le nombre de cas de GEA médicalisés (GEAm) observés sur certaines communes du secteur géographique desservi ;
- 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 GEAm ;
  - construire un modèle multi-exposition (contenant plusieurs *proxy* d'expositions) plausible à partir des données d'exploitation disponibles.

### 3. Matériels et méthodes

Avant 1870, la ville de Nancy était alimentée par des eaux de source en provenance principale de la forêt de Haye, à l'ouest de l'agglomération. À partir de 1870, pour palier des quantités devenues insuffisantes et une qualité fluctuante, un captage fut mis en service au sein des nappes alluviales de la Moselle dans la commune de Messein. L'eau subissait alors une simple javellisation avant sa distribution. La dégradation des eaux de la Moselle au fil des années et l'insuffisance de la production du captage entraîna la construction de l'usine Saint-Charles et sa mise en service en 1932. L'usine Edouard Imbeaux fut mise en service en 1985. L'usine Saint-Charles fut totalement abandonnée en juillet 2013.

#### 3.1. Secteur d'étude

Le secteur d'étude correspond au secteur desservi par les deux usines et comprend 19 communes (tableau 1) de la CUGN. La commune de Jarville-la-Malgrange n'a pas été incluse dans l'étude du fait de l'impossibilité d'obtenir les données sanitaires la concernant. Du fait du faible effectif de cette commune au regard de l'ensemble du secteur d'étude (9 444 vs 246 502), l'incidence de cette omission peut être considéré comme négligeable sur les résultats produits.

**Tableau 1**

Liste des communes du secteur d'étude et caractéristiques de population

| Code Insee   | Commune                   | Population*   |                |                |
|--------------|---------------------------|---------------|----------------|----------------|
|              |                           | 1-15 ans      | 16 ans +       | Total          |
| 54025        | Art-sur-Meurthe           | 235           | 1 039          | 1 274          |
| 54165        | Dommartemont              | 112           | 541            | 653            |
| 54184        | Essey les Nancy           | 1 191         | 6 062          | 7 253          |
| 54197        | Fleville devant Nancy     | 399           | 2 029          | 2 429          |
| 54257        | Heillecourt               | 1 040         | 4 900          | 5 939          |
| 54265        | Houdemont                 | 539           | 1 923          | 2 461          |
| 54300        | Laneuveville devant Nancy | 1 278         | 4 439          | 5 717          |
| 54304        | Laxou                     | 2 286         | 12 902         | 15 188         |
| 54328        | Ludres                    | 1 274         | 5 372          | 6 645          |
| 54339        | Malzéville                | 1 487         | 6 547          | 8 034          |
| 54357        | Maxéville                 | 1 742         | 7 072          | 8 814          |
| 54395        | Nancy                     | 13 529        | 90 871         | 104 400        |
| 54439        | Pulnoy                    | 877           | 3 736          | 4 613          |
| 54482        | Saint-Max                 | 1 480         | 8 661          | 10 141         |
| 54495        | Saulxures-lès-Nancy       | 675           | 3 221          | 3 897          |
| 54498        | Seichamps                 | 916           | 4 234          | 5 150          |
| 54526        | Tomblaine                 | 1 512         | 6 077          | 7 589          |
| 54547        | Vandœuvre-lès-Nancy       | 5 087         | 25 929         | 31 016         |
| 54578        | Villers-lès-Nancy         | 2 090         | 13 199         | 15 289         |
| <b>Total</b> |                           | <b>37 749</b> | <b>208 753</b> | <b>246 502</b> |

\*Données : Institut national de la statistique et des études économiques (Insee), RP2006

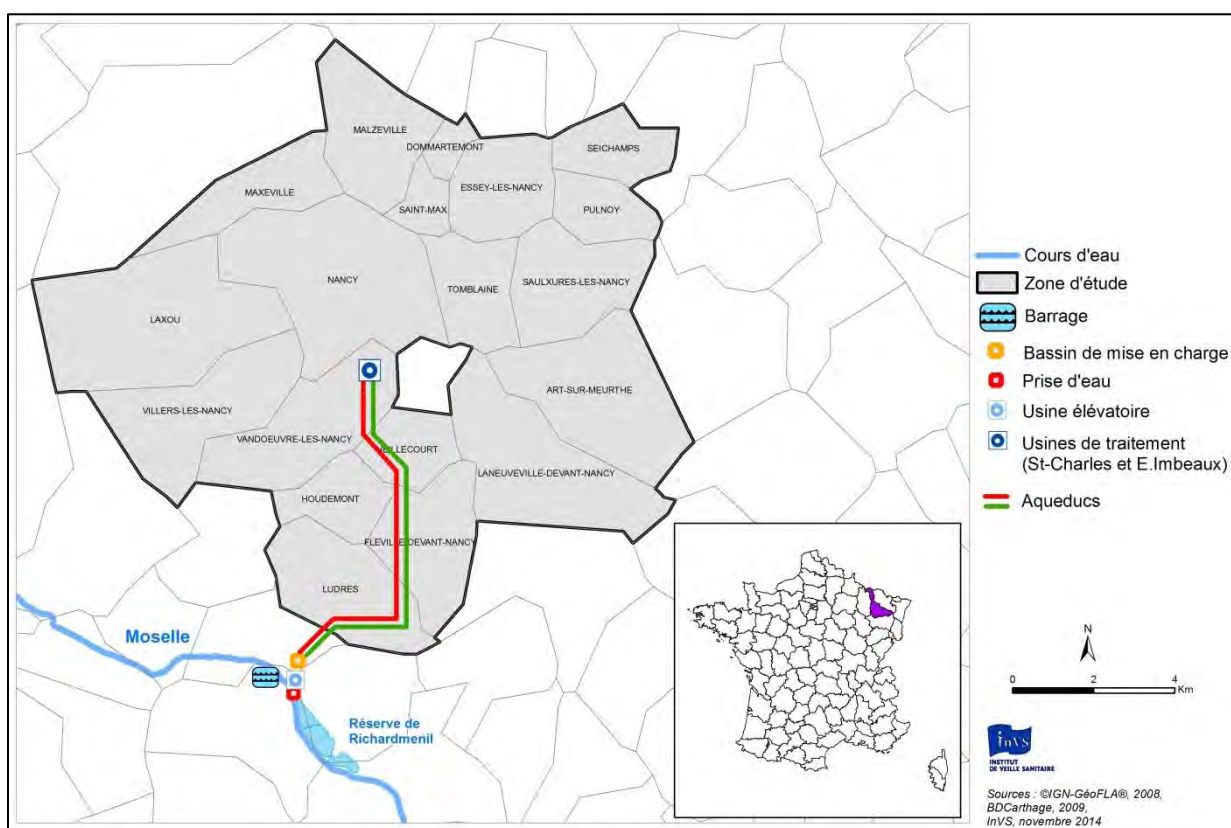
L'eau brute, pompée dans la Moselle dans la commune de Messein (figure 1), subit trois prétraitements directement sur le site de pompage :

- un dégrillage (mailles de 60 mm) permettant de retenir les objets flottants ;
- un tamisage par filtre de type Beaudrey, de maille de 0,5 mm, permettant d'éliminer les corps solides en suspension ;
- une pré-chloration à un taux de 1,5 à 15 g de  $\text{Cl}_2/\text{m}^3$  dans l'objectif de préserver la qualité de l'eau durant son transport jusqu'aux usines de traitement. Le taux était ajusté en permanence afin d'obtenir un résiduel de chlore à l'arrivée de l'eau brute à l'usine. Cette pré-chloration a été abandonnée en 2008.

Huit pompes alimentent un bassin de stockage de 5 000 m<sup>3</sup> à raison de 80 000 m<sup>3</sup>/j. Ce bassin permet le maintien en charge de deux aqueducs dans lesquels l'eau s'écoule gravitairement jusqu'aux usines situées dans la commune de Vandœuvre-lès-Nancy. Les deux aqueducs, de 1 250 et 1 200 mm de diamètre, acheminent l'eau sur une distance d'environ 11 km en 4 à 6 heures.

Figure 1

Situation géographique du secteur d'étude



Entre 2002 et 2007, les filières de l'usine Saint-Charles (capacité de 80 000 m<sup>3</sup>/j) et de l'usine Edouard Imbeaux (capacité de 100 000 m<sup>3</sup>/j) étaient de principe similaire et comportaient les 7 étapes suivantes :

- un pré-conditionnement de l'eau par injection de sulfate d'alumine (50 g/m<sup>3</sup>), d'alginate de sodium (0,2 g/m<sup>3</sup>) et de lait de chaux (0 à 15 g/m<sup>3</sup>) au sein d'un ouvrage de 220 m<sup>3</sup> permettant un temps de séjour de 5 mn ;
- une décantation *via* des décanteurs de type Cycloflocs, avec une vitesse de surverse de 8 m/h et un temps de séjour d'environ 45 mn ;
- une filtration rapide sur sable *via* 8 filtres constitués d'un massif filtrant de 52 m<sup>2</sup> et de 1,2 m d'épaisseur. La vitesse de filtration est de 10,2 m/h et le temps de séjour de 8 à 15 mn ;
- une ozonation au sein d'une tour de contact de 400 m<sup>3</sup> permettant un temps de contact de 6 mn avec un taux d'ozone de 2 g/m<sup>3</sup> au maximum ;
- une filtration sur charbon actif en grain *via* 6 filtres constitués d'un massif filtrant de 48,6 m<sup>2</sup> et de 1,3 m d'épaisseur. La vitesse de filtration est de 12,4 m/h ;
- une neutralisation par ajout d'eau de chaux entre 5 et 15 g de Ca(OH)<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> ;
- et enfin une chloration à un taux moyen de 0,5 g de Cl<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

L'eau produite est acheminée vers deux réservoirs de tête d'une capacité respective de 3 500 et 20 000 m<sup>3</sup>. À partir de ces ouvrages, l'eau emprunte un réseau maillé et étagé sur 3 niveaux (gravitaire, relevé et surélevé) tout en transitant vers d'autres réservoirs et stations de pompage. La pression de service varie entre 1,8 et 6 bars. Le réseau de distribution est constitué de 950 km de conduites principales et de 480 km de branchements. Au total, 31 réservoirs permettent une capacité de stockage d'environ 100 000 m<sup>3</sup>.

## 3.2. Données et variables

Les données disponibles couvrent la période du 1<sup>er</sup> janvier 2002 au 30 juin 2007. À partir de ces données, les variables environnementales ont été construites sur la même période dans l'optique d'évaluer l'exposition des consommateurs d'eau de distribution sur l'ensemble du secteur d'étude (tableau 2).

### 3.2.1. Données environnementales

#### 3.2.1.1. Turbidités

Les turbidités des eaux brutes et traitées étaient mesurées de manière automatique sur l'ensemble de la période d'étude. Les valeurs fournies par la SNE étaient les moyennes quotidiennes de mesures ponctuelles réalisées environ toutes les 20 minutes. La turbidité de l'eau brute était mesurée à Messein, au niveau du pompage en Moselle. La turbidité de l'eau traitée était mesurée en sortie de l'usine E. Imbeaux à Nancy et ne représente donc pas la turbidité en sortie de l'usine Saint-Charles. La gamme de mesure s'étend de 0 à 1 000 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) pour la turbidité de l'eau brute et de 0 à 2 NTU pour la turbidité de l'eau traitée.

La turbidité de l'eau brute préchlorée était obtenue à partir d'une mesure manuelle quotidienne réalisée à l'arrivée des eaux dans les usines de production. Le nombre important de données manquantes est dû à l'absence de mesures les dimanches et jours fériés. La gamme de mesure s'étend de 0 à 160 NTU.

### 3.2.1.2. Débit de la ressource

Les données quotidiennes de débit de la Moselle ont été extraites depuis la banque hydro gérée par le ministère chargé de l'écologie. Les mesures étaient réalisées sur la station de Tonnoy située en amont de la prise d'eau.

### 3.2.1.3. Débits produits

Les débits produits étaient mesurés en continue à la sortie de chaque usine. La variable débit total produit est la somme des débits produits par chaque usine. Lorsque l'un des deux débits était manquant, le débit total produit était considéré comme manquant.

**Tableau 2**

Intitulé des variables environnementales utilisées

| Intitulé de la variable | Unité             | Libellé                                                                                         |
|-------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| spe114                  | nb/j              | Nombre de cas de gastro-entérites médicalisés chez les 1-15 ans                                 |
| spe15+                  | nb/j              | Nombre de cas de gastro-entérites médicalisés chez les 16 ans et plus                           |
| t.e.moselle             | °C                | Température moyenne de l'eau de la Moselle, à Messein                                           |
| Q.Mo                    | m <sup>3</sup> /s | Débit quotidien de la Moselle, à Tonnoy                                                         |
| tuEB.Mo                 | NTU               | Turbidité moyenne de l'eau de la Moselle, à Messein                                             |
| tuEB.PréCl              | NTU               | Turbidité moyenne de l'eau préchlorée, à l'arrivée aux usines                                   |
| tuET                    | NTU               | Turbidité moyenne de l'eau produite, à la sortie de l'usine E. Imbeaux                          |
| Q.sor                   | m <sup>3</sup> /j | Débit total produit par les usines St-Charles et E. Imbeaux                                     |
| Q.us.StC                | m <sup>3</sup> /j | Débit quotidien produit par l'usine St-Charles                                                  |
| Q.us.Im                 | m <sup>3</sup> /j | Débit quotidien produit par l'usine E. Imbeaux                                                  |
| Vol.Imb                 | %                 | Proportion quotidienne d'eau produite par l'usine E. Imbeaux par rapport au débit total produit |
| NbCoupures              | nb/j              | Nombre de coupures d'eau sur le secteur d'étude                                                 |
| NbIntervention          | nb/j              | Nombre d'interventions pour fuite d'eau sur le secteur d'étude                                  |
| NbNettoyage             | nb/j              | Nombre de nettoyages des réservoirs sur le secteur d'étude                                      |

Une variable proportion d'eau produite par l'usine E. Imbeaux a été construite comme le rapport du débit produit par cette usine sur le débit total produit par les deux usines.

### 3.2.1.4. Températures et précipitations

La température de l'eau de la Moselle faisait l'objet d'une mesure automatique sur le site de pompage. La SNE fournissait une valeur moyenne quotidienne issue de plusieurs mesures réalisées sur un pas de temps d'environ 20 minutes.

La température de l'air a été obtenue à partir des mesures réalisées par Météo France à la station météorologique de Tomblaine (Nancy-Essey). La moyenne quotidienne est la moyenne des *minima* et *maxima* quotidiens.

Les variables précipitations, disponibles à partir des stations météorologiques de Bayon, Ochey et Tomblaine, n'ont pas été utilisées du fait de l'absence de résultats probants lors des précédents volets de l'étude.

### 3.2.1.5. Variables relatives aux interventions sur le réseau de distribution

Les comptes d'interventions étaient fournis par la CUGN.

Le nombre de coupures d'eau correspond aux coupures d'eau recensées par la CUGN sur l'ensemble des communes du secteur d'étude.

Le nombre d'interventions comptabilise les interventions programmées ou non sur le réseau public situé en amont des compteurs individuels. Elles comprennent les purges du réseau, les travaux de maintenance ou suite à des ruptures de canalisations, les réparations de fuite ou encore les essais de pressions réalisés par la CUGN ou les pompiers. Les interventions entraînant une coupure d'eau ne sont pas identifiées comme telles. Lorsque le motif de l'intervention n'était pas renseigné, dans 30 % des cas, l'intervention était tout de même comptabilisée comme une intervention sur le réseau public. Ces données n'ont pu être expertisées rétrospectivement mais les comptes journaliers indiquent l'inclusion probable et par erreur de travaux sur des branchements.

Le nombre de nettoyages recense les nettoyages de tout ou partie d'un réservoir de stockage situé sur le secteur d'étude.

### 3.2.2. Données sanitaires

Deux indicateurs de santé ont été produits à partir des données de remboursements de médicaments extraites de la base Erasme (Extraction, recherche et analyses pour un suivi médico-économique) fournie par l'Assurance maladie [2;3]. L'indicateur spe115 estime le nombre quotidien de cas de GEAm chez les enfants âgés de 1 à 15 ans inclus. Il a été utilisé pour la construction du modèle. L'indicateur spe16+ comprends 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 GEAm était extraite de la base. Les classes thérapeutiques utilisées comprenaient les ralentisseurs du transit intestinal, les produits microbiens antidiarrhéiques, 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 Beaudeau, *et al.* en 2006 [2]. Celle-ci est restreinte aux ordonnances contenant un antiseptique intestinal ou un antiémétique. Elle présente un taux d'incidence national moyen et une saisonnalité similaires à celle des indicateurs fournis par le réseau des médecins sentinelles.

### 3.3. Le modèle statistique

Les données de l'indicateur sanitaire, exprimant le nombre de cas quotidiens de GEAm, sont supposées provenir d'un processus de Poisson non stationnaire sur-dispersé. 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 [7]. L'ajustement du modèle a été réalisé avec les seuls facteurs de confusion de manière à minimiser l'autocorrélation résiduelle et à obtenir des résidus assimilables à un bruit blanc. Les variables d'exposition étaient ensuite introduites dans le modèle ajusté.

Les 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 [7].

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).

### 3.4. Étude du rôle de la turbidité

Le premier objectif de cette étude est de tester le rôle de la turbidité des eaux consommées dans l'apparition des GEAm sur la zone d'étude. Dans un premier temps, le modèle statistique a été construit en intégrant uniquement ce *proxy* comme variable d'exposition, en plus des variables de contrôle.

#### 3.4.1. Définition du *proxy* d'exposition utilisé

Le *proxy* d'exposition utilisé correspond à la moyenne quotidienne de la turbidité de l'eau traitée. Cette variable reflète une exposition moyennée sur une journée. Les précédents résultats montrent que la moyenne quotidienne est mieux corrélée que le maximum horaire à l'incidence des GEAm.

### 3.4.2. Latence et décalage de l'exposition

Selon l'exploitant, le temps entre la production de l'eau et sa consommation (moment de l'exposition) varie entre quelques heures et 1 jour. Il a donc été fixé à moins d'1 jour.

La période d'incubation moyenne d'une GEA 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 [8]. Les résultats obtenus dans les précédents volets de l'étude turbidité et gastro-entérites suggèrent que le mode de la durée d'incubation se situe entre 4 et 6 jours.

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

Au final, il est plausible d'attendre un pic de la réponse au sixième jour (respectivement 0+5+1 jours) après la production de l'eau. Pour tenir compte d'une probable variabilité dans le délai de réponse et stabiliser son effet, le *proxy* d'exposition a été moyenné sur trois journées successives et centré sur le *lag* 6 (moyennes des valeurs quotidiennes des *lags* 5 à 7).

## 3.5. 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.

### 3.5.1. Analyses mono-exposition

Les covariables d'exposition ont été introduites à tour de rôle dans le modèle statistique incluant les variables de contrôle. Les tests portaient sur l'association entre le nombre de cas de GEAm au jour  $j$  et 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). Les résultats étaient analysés à partir des critères statistiques et de plausibilité suivants :

- la significativité de l'association (seuil retenu à  $p \leq 0,05$ ) ;
- la cohérence de la forme de la fonction de réponse sur un ensemble de décalages temporels consécutifs (significativité et conservation des formes). La portée de ce critère peut être limitée par l'autocorrélation de la variable testée ;
- la robustesse de la fonction de réponse au retrait des 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'eau, 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.

### 3.5.2. Analyse multi-exposition

Sur la base des résultats obtenus lors des analyses mono-exposition, une sélection des covariables pertinentes a été réalisée pour construire le modèle multi-exposition.

Le modèle multi-exposition retenu au final a été testé en substituant l'indicateur sanitaire « enfants » par l'indicateur sanitaire « adultes ». La conséquence attendue de cette manipulation était la mise en évidence d'un risque de type similaire, d'un niveau éventuellement différent mais sans modifications importantes de la forme des relations ou de la significativité des associations.

## 4. Résultats

### 4.1. Qualité des données

Les deux indicateurs sanitaires présentent 3,1 % de données manquantes, dont un mois complet en juin 2004 (tableau 3). L'indicateur spe114 présente 98 valeurs nulles dont 80 (81,6 %) apparaissent un dimanche. L'indicateur spe15p présente 21 valeurs nulles dont 19 (90,5 %) apparaissent un dimanche. Le nombre moyen de cas de GEAm est 3,1 fois plus élevé chez les adultes que chez les enfants alors que les données 2006 du recensement de la population (Insee, 2006) laissent apparaître un ratio adultes/enfants de 5,53.

**Tableau 3**

Caractéristiques des distributions des variables utilisées sur le secteur de Nancy

| Variables           | Unité                  | Valeurs manquantes (%) | Valeurs nulles (%) | Moyenne | Écart-type | Percentiles |      |      |      |      |      |       |       |
|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------|------------|-------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|                     |                        |                        |                    |         |            | Min         | 10   | 25   | 50   | 75   | 90   | 98    | Max   |
| Cas GEAm 1-15 ans   | nb/j                   | 3,1                    | 5,1                | 10      | 8,3        | 0           | 1    | 4    | 8    | 14   | 21   | 34    | 57    |
| Cas GEAm 16 et +    |                        | 3,1                    | 1,3                | 31      | 24,2       | 0           | 3    | 15   | 28   | 40   | 58   | 96    | 216   |
| Température air     | °C                     | 0,0                    | 0,1                | 11,1    | 7,5        | -8,5        | 0,9  | 5,5  | 11,3 | 16,9 | 20,9 | 24,5  | 29,1  |
| Température eau     |                        | 5,5                    | 0,0                | 13,3    | 6,5        | 1,4         | 4,8  | 7,7  | 13,0 | 18,8 | 22,3 | 25,3  | 27,6  |
| Débit Moselle       | m <sup>3</sup> /s      | 0,0                    | 0,0                | 47      | 58,9       | 3,1         | 8,2  | 13,5 | 30,2 | 56,6 | 96,6 | 237,2 | 770,0 |
| Débit produit total | m <sup>3</sup> /j x100 | 5,3                    | 0,0                | 68,7    | 7,6        | 42,6        | 58,7 | 63,7 | 68,8 | 73,8 | 78,1 | 84,4  | 112,4 |
| Débit E. Imbeaux    |                        | 4,5                    | 0,0                | 58,3    | 8,0        | 14,5        | 48,4 | 53,3 | 58,5 | 63,6 | 67,7 | 73,9  | 87,7  |
| Débit St-Charles    |                        | 5,3                    | 1,5                | 10,5    | 5,1        | 0           | 6,1  | 9,0  | 10,5 | 11,5 | 13,0 | 22,7  | 69,9  |
| Proportion débit    | %                      | 5,3                    | 0,0                | 0,85    | 0,07       | 0,20        | 0,81 | 0,83 | 0,85 | 0,87 | 0,91 | 0,98  | 1,00  |
| Turbidité EB        | NTU                    | 5,7                    | 0,1                | 8       | 15         | 0           | 2    | 3    | 5    | 7    | 12   | 44    | 290   |
| Turbidité EB-PC     |                        | 19,6                   | 0,0                | 7,1     | 12,3       | 1           | 2    | 3    | 4    | 7    | 12   | 37    | 230   |
| Turbidité ET        |                        | 17,7                   | 0,1                | 0,07    | 0          | 0,03        | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,13  | 0,23  |
| Nb coupures         | nb/j                   | 0,0                    | 50,4               | 1,7     | 2,7        | 0           | 0    | 0    | 0    | 2    | 5    | 9     | 30    |
| Nb interventions    |                        | 0,0                    | 72,8               | 0,5     | 1,1        | 0           | 0    | 0    | 0    | 1    | 2    | 4     | 15    |

EB : eau brute ; EB-PC : eau brute préchlorée ; ET : eau traitée.

La variable température de l'eau présente 111 valeurs manquantes sur l'ensemble de la chronique, soit 5,5 % des données. La température de l'air ne présente pas de données manquantes. Le débit de la Moselle est renseigné sur l'ensemble de la période d'étude. Les débits produits par les usines E. Imbeaux et Saint-Charles présentent respectivement 5,3 % et 4,5 % de données manquantes, ce qui entraîne un niveau de données manquantes de 5,3 % pour les variables « débit produit total » et « proportion de débit ».

Les chroniques de turbidité de l'eau brute, de l'eau brute préchlorée et de l'eau traitée présentent respectivement 5,7 %, 19,6 % et 17,7 % de données manquantes.

Les variables nombre de coupures d'eau et nombre d'interventions sur le réseau ne présentent pas de données manquantes. Toutefois, vu le mode de recueil de ces variables et le taux élevé de valeurs nulles, respectivement de 50,4 % et 72,8 %, il est possible que les valeurs manquantes en réalité soient considérées comme des valeurs nulles.

## 4.2. Distribution des variables

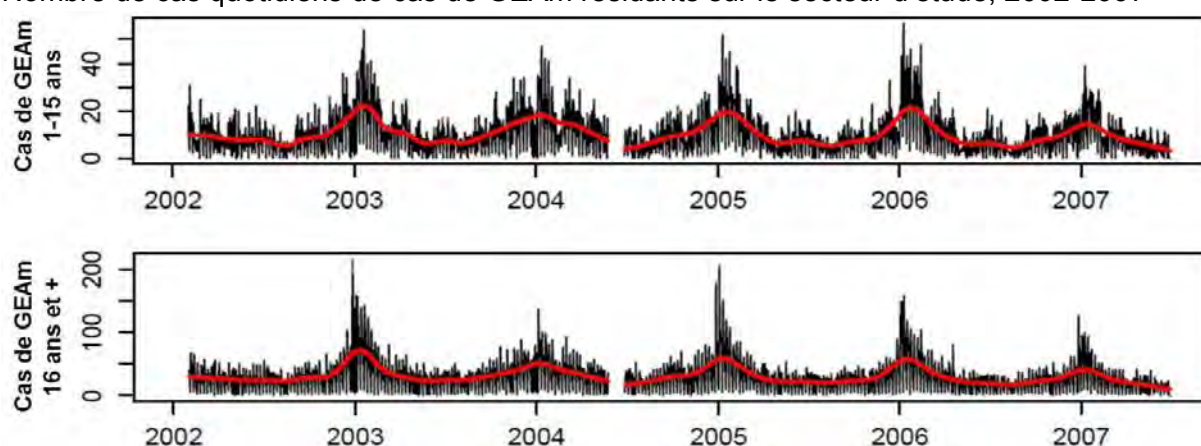
### 4.2.1. Incidence des GEAm

La série chronologique du nombre de cas de GEAm chez les 1-15 ans suit les pics hivernaux des épidémies de gastro-entérites (figure 2). Le maximum de 57 cas de GEA a été observé le 9 janvier 2006 et correspond à 5,7 fois le nombre de cas moyen sur l'ensemble de la chronique.

Chez les adultes, le maximum de 216 cas de GEAm a été observé le 27 décembre 2002. Il correspond à environ 7 fois la valeur moyenne de cas de GEA. Les épidémies hivernales de 2003, 2005 et 2006 ont été particulièrement marquées.

Figure 2

Nombre de cas quotidiens de cas de GEAm résidants sur le secteur d'étude, 2002-2007

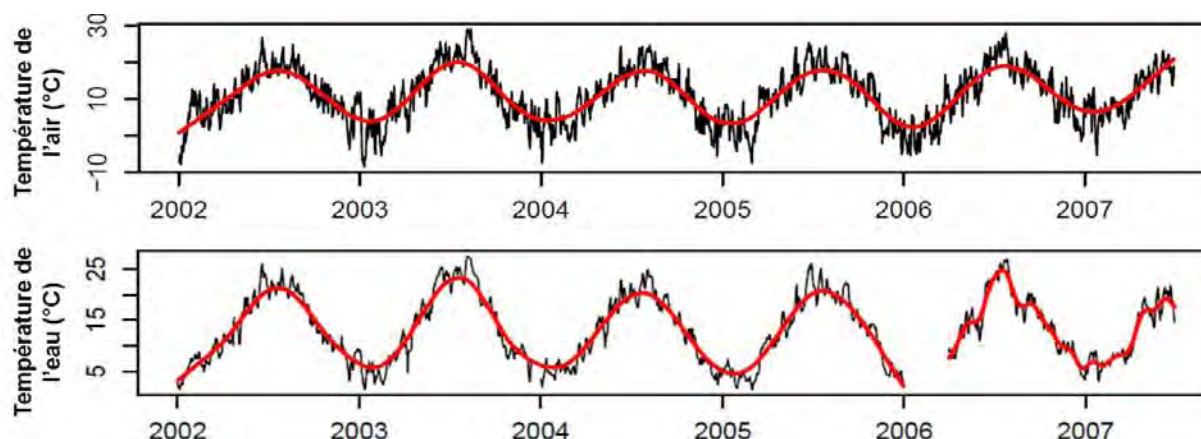


### 4.2.2. Températures

La chronique de température de l'eau de la Moselle présente la même saisonnalité que la température de l'air mesurée à la station de Nancy-Tomblaine (figure 3). Le maximum de température de l'eau de 27,6 °C était mesuré le 7 août 2003 et le minimum de 1,4 °C le 2 mars 2005. Le maximum de température de l'air de 29 °C était mesuré le 13 août 2003 et le minimum de -8,5 °C le 10 janvier 2003.

Figure 3

Série temporelle de la température de l'eau brute (Moselle), 2002-2007



### 4.2.3. Paramètres de qualité de l'eau brute

Les données du contrôle sanitaire ont été extraites de la base SISE-Eaux (Système d'information en santé environnement – Eaux) du ministère chargé de la santé afin d'évaluer la qualité microbiologique de l'eau de la Moselle sur la période 2002-2007. Les paramètres coliformes totaux, coliformes thermotolérants et entérocoques étaient disponibles et 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 4).

Le niveau moyen de contamination microbiologique par les coliformes totaux est de 4 564 UFC/100 ml. Les niveaux des concentrations en coliformes thermotolérants et entérocoques sont respectivement 2 et 14 fois moindre (2 018 et 329 UFC/100 ml).

**Tableau 4**

Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes de la Moselle à Messein, 2002-2007

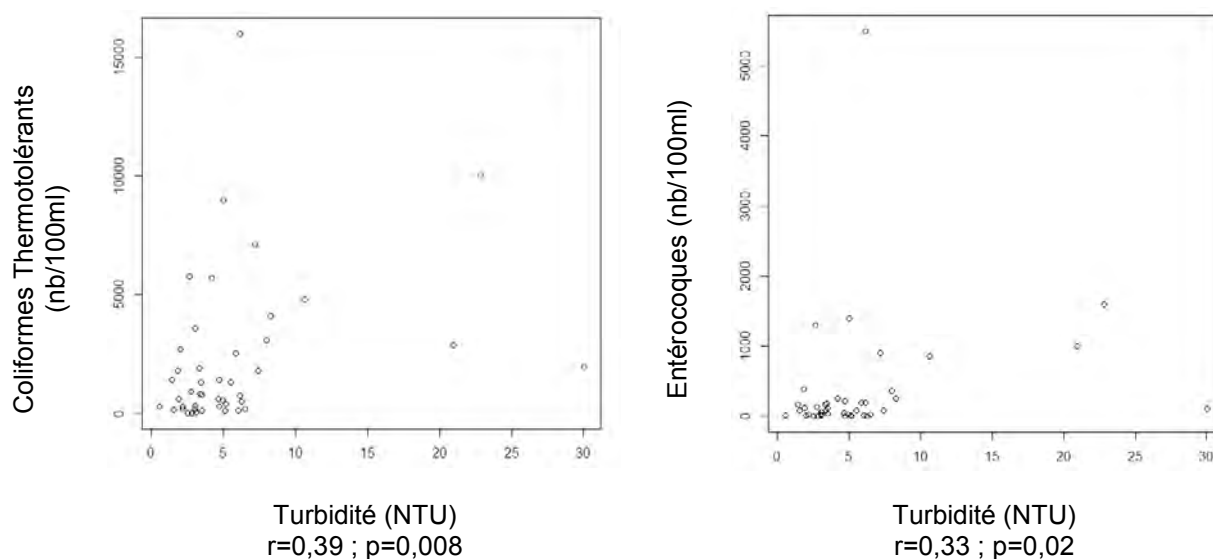
| Paramètre<br>(par 100 ml)  | Nombre<br>d'analyses | Moyenne | Écart-<br>type | Percentiles |     |     |       |       |        |        |        |
|----------------------------|----------------------|---------|----------------|-------------|-----|-----|-------|-------|--------|--------|--------|
|                            |                      |         |                | Min         | 10  | 25  | 50    | 75    | 90     | 98     | Max    |
| Coliformes totaux          | 38                   | 4 564   | 5 986          | 30          | 321 | 600 | 2 800 | 4 475 | 12 300 | 19 640 | 30 000 |
| Coliformes thermotolérants | 62                   | 2 018   | 2 893          | 10          | 121 | 293 | 775   | 2 660 | 5 630  | 9 780  | 16 000 |
| Entérocoques               | 62                   | 329     | 764            | 2           | 15  | 30  | 94    | 253   | 902    | 1 556  | 5 500  |

*Données SISE-Eaux, ministère chargé de la santé.*

Les analyses de régression réalisées (méthode de Spearman) montrent une corrélation entre le niveau de turbidité de la Moselle et le niveau de contamination par les coliformes thermotolérants mais pas de corrélation avec le niveau de contamination par les entérocoques (figure 4).

**Figure 4**

Distribution de la contamination microbiologique des eaux brutes de la Moselle à Messein en fonction de la turbidité, période 2002-2007

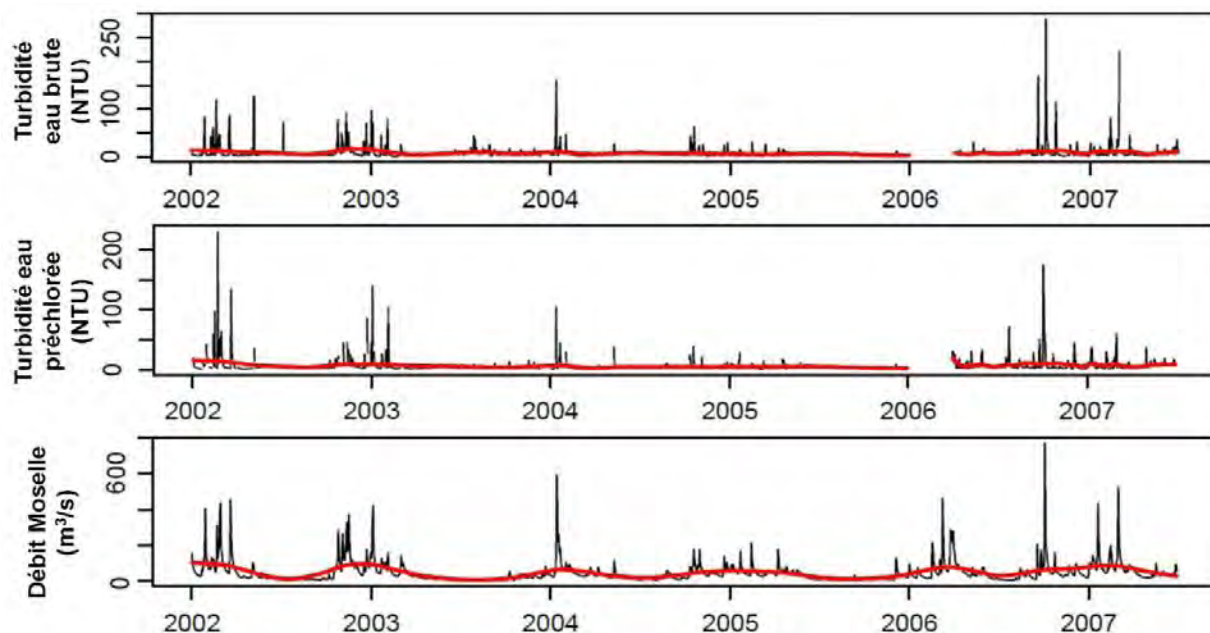


*Test de la corrélation réalisé avec la méthode de Spearman.*

Les chroniques de turbidité de l'eau de la Moselle, de l'eau préchlorée et du débit de la Moselle présentent une allure très similaire (figure 5). Les maxima de débit de la Moselle (770 m<sup>3</sup>/s) et de turbidité de l'eau brute (290 NTU) ont été atteints le 4 octobre 2006. Les pics de débit se produisent régulièrement en période hivernale et représentent entre 5 et 16 fois le débit moyen. Ils sont très fréquemment associés à un pic de turbidité compris entre 50 et 290 NTU.

Figure 5

Séries temporelles de la turbidité de l'eau brute, de la turbidité de l'eau préchlorée et du débit de la Moselle à Nancy, 2002-2007



#### 4.2.4. Paramètres de qualité de l'eau traitée

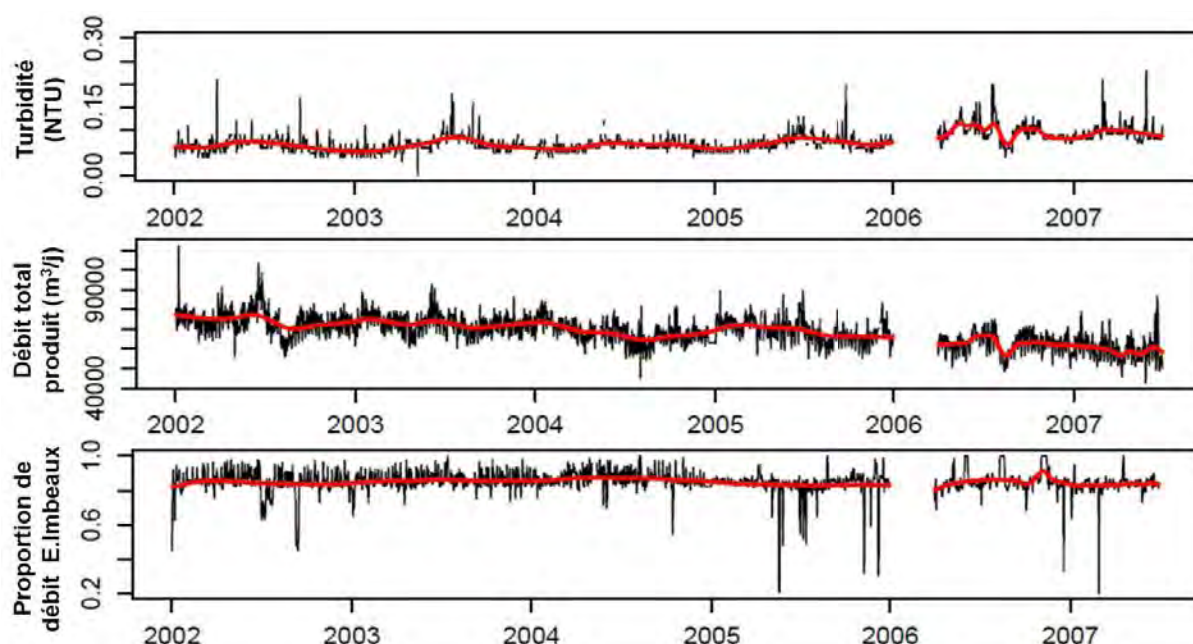
La turbidité de l'eau produite par la SNE est stable autour de 0,07 NTU sur l'ensemble de la période d'étude (figure 6). On observe une variabilité plus forte de la turbidité à la mi-année 2006 puis une stabilisation en 2007. Le maximum de turbidité de l'eau traitée de 0,23 NTU a été observé le 28 mai 2007. Le niveau de 0,15 NTU (percentile 99) a été dépassé 14 fois sur la période d'étude.

La production moyenne des deux usines réunies est de 68 713 m<sup>3</sup>/j sur la période d'étude. Elle présente une tendance à la baisse entre le début (≈75 000 m<sup>3</sup>/j) et la fin (≈60 000 m<sup>3</sup>/j) de la période d'étude.

L'usine E. Imbeaux contribue en moyenne à 85 % du débit total produit. Cette proportion est stable sur la période d'étude. Entre 2005 et 2006, l'usine Saint-Charles a été mise à contribution afin de palier une réduction du débit produit par l'usine E. Imbeaux. Ces modifications ne se traduisent pas par un changement de la turbidité de l'eau traitée.

Figure 6

Séries temporelles de la turbidité de l'eau traitée par l'usine E. Imbeaux, du débit total produit et de la proportion de débit total produite par l'usine E. Imbeaux, 2002-2007

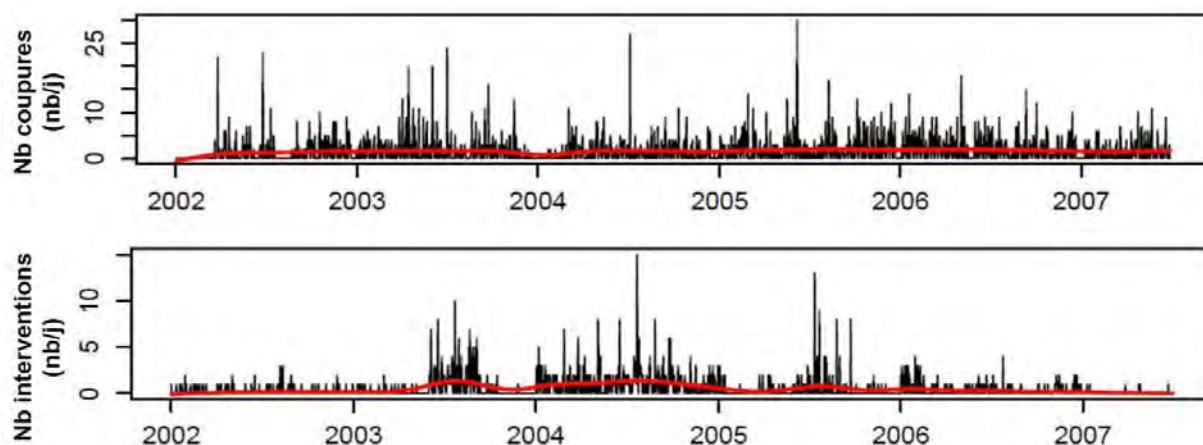


#### 4.2.5. Gestion du réseau de distribution

Le nombre moyen de coupures d'eau sur le réseau de la CUGN est d'environ deux par jour. Le maximum de 30 coupures en une seule journée (sur différentes branches du réseau) a été observé le 7 juin 2005 (figure 7). Le nombre d'interventions sur le réseau est d'environ d'une tous les deux jours (figure 7). Le seuil de 10 interventions par jour a été dépassé 19 fois entre 2003 et 2005 et à aucun moment sur le reste de la période d'étude. Le maximum de 15 interventions en une journée a été observé le 22 juillet 2004. Selon l'exploitant, la répartition inégale des interventions par année laisse suspecter un changement de définition de la variable au fil des années.

Figure 7

Séries temporelles du nombre de coupures d'eau et du nombre d'interventions sur réseau, 2002-2007



## 4.2.6. Corrélation entre covariables

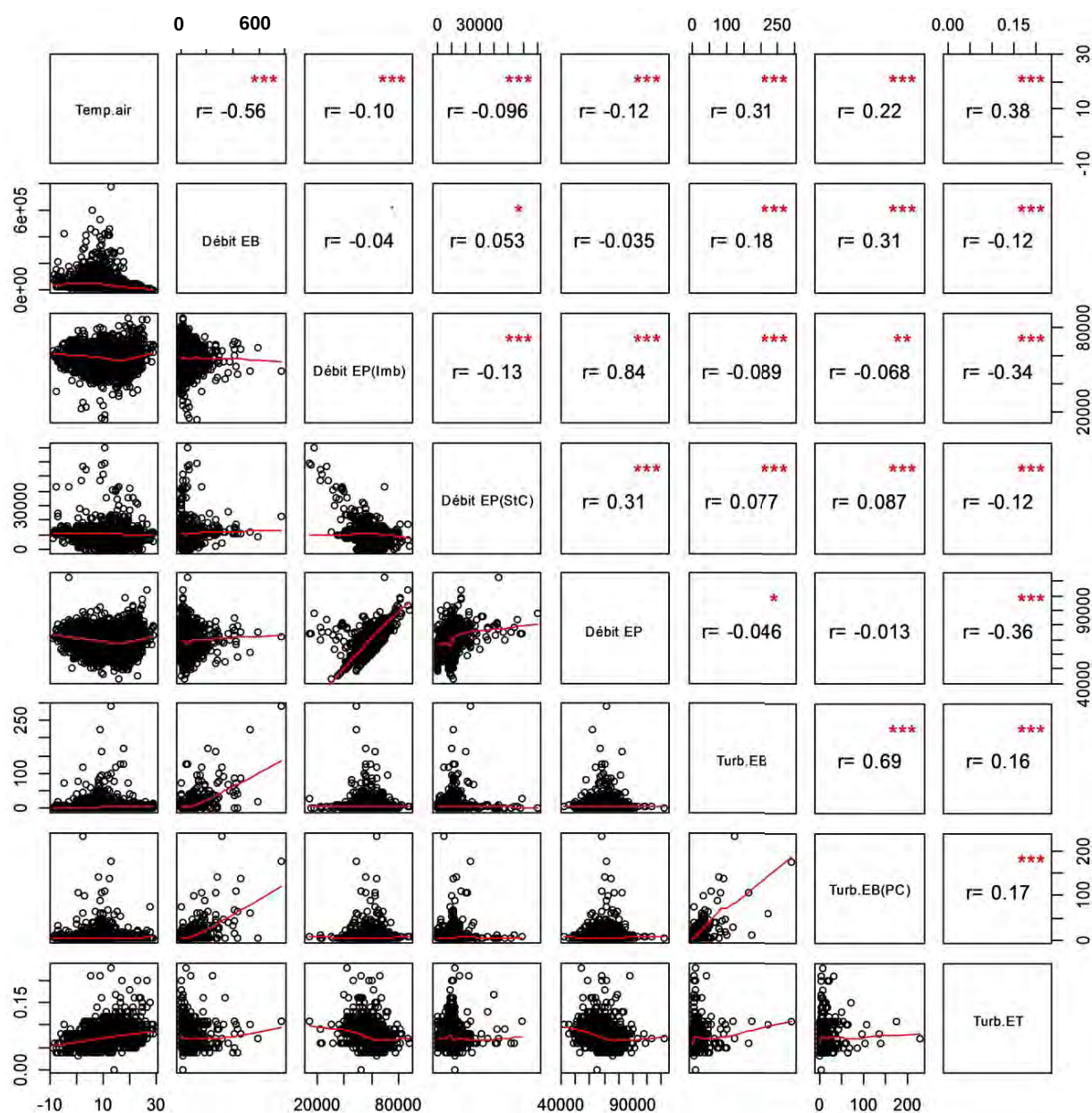
La corrélation entre chaque variable disponible a été testée selon la méthode de Spearman (figure 8).

La turbidité de l'eau traitée est corrélée positivement à la turbidité de l'eau brute ( $\rho=0,16$ ,  $p<1.10^{-3}$ ) et à la turbidité de l'eau brute préchlorée ( $\rho=0,17$ ,  $p<1.10^{-3}$ ). Elle est corrélée négativement au débit total produit ( $\rho=-0,36$ ,  $p<1.10^{-3}$ ).

La température de l'air est corrélée positivement à la turbidité de l'eau brute ( $\rho=0,31$ ,  $p<1.10^{-3}$ ), de l'eau brute préchlorée ( $\rho=0,22$ ,  $p<1.10^{-3}$ ) et de l'eau traitée ( $\rho=0,38$ ,  $p<1.10^{-3}$ ). Elle est corrélée négativement au débit de l'eau brute ( $\rho=-0,56$ ,  $p<1.10^{-3}$ ).

Figure 8

Matrice des corrélations entre covariables utilisables



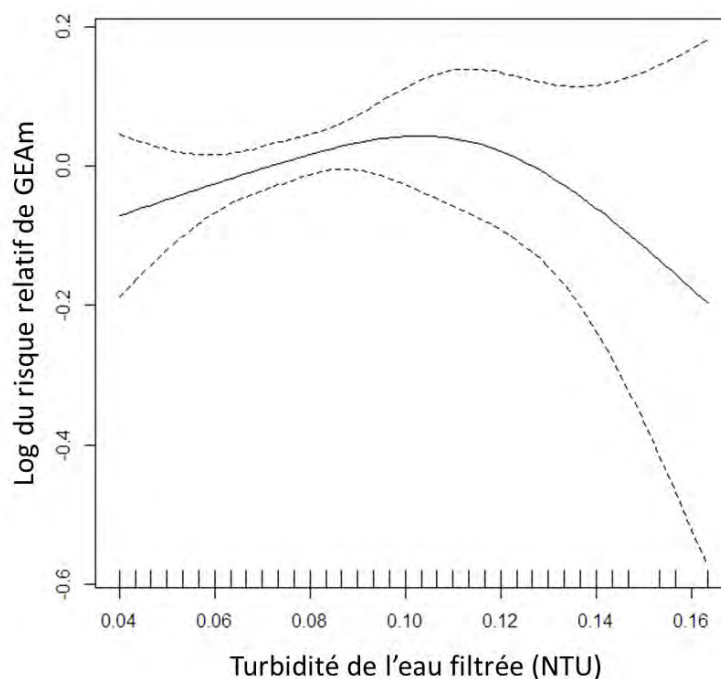
### 4.3. Relation entre la turbidité et l'incidence des GEAm

La première analyse réalisée a consisté à tester la relation entre la turbidité de l'eau traitée mesurée en sortie de l'usine E. Imbeaux, sur une moyenne des *lags* 5 à 7, et le nombre de cas incidents de GEAm observés chez les 1-15 ans. Ce test était réalisé avec un contrôle de la température de l'eau brute (moyenne des *lags* 5 à 7).

La forme de la relation entre la turbidité de l'eau traitée et l'incidence des GEAm présente une forme croissante entre 0,04 et 0,10 NTU, puis indéterminée au-delà de 0,10 NTU (figure 9). L'association n'est pas significative ( $p=0,34$ ). L'exclusion des valeurs extrêmes de turbidité ( $>p98$ ) accentue la partie croissante de la relation et améliore la significativité de l'association, sans que celle-ci devienne significative ( $p=0,21$ ).

Figure 9

Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans en fonction de la turbidité de l'eau traitée par l'usine E. Imbeaux, avec une latence moyenne de l'effet de 5-7 jours, 2002-2007



## 4.4. Recherche d'autres facteurs de risque des GEAm

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

**Tableau 5**

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

| Variables            |                                   | jeu de données | Lags |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |   | Tendance attendue |
|----------------------|-----------------------------------|----------------|------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|---|-------------------|
|                      |                                   |                | 5    | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |   |                   |
| Eau brute            | Température                       | p100           | 4    | 4 | 4 | 6 | 6 | 5  | 3  | 2  |    |    |    |   | U                 |
|                      |                                   | <p98           | 3    | 4 | 5 | 6 | 6 | 4  | 3  | 2  | 1  |    | 1  |   |                   |
|                      | Débit                             | p100           | 2    |   | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  |    |    |    |   | U*                |
|                      |                                   | <p98           | 1    |   | 1 | 1 | 2 | 1  | 1  |    |    |    |    |   |                   |
|                      | Turbidité                         | p100           |      |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |   | ↗                 |
|                      |                                   | <p98           | 1    |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |   |                   |
| Eau brute préchlorée | Turbidité                         | p100           |      |   | 1 |   |   | 2  | 1  |    | 1  | 1  | 1  | ↗ |                   |
|                      |                                   | <p98           |      |   | 1 |   |   | 3  | 1  |    | 1  | 1  |    |   |                   |
| Eau traitée          | Turbidité                         | p100           |      |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | ↗ |                   |
|                      |                                   | <p98           |      |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |   |                   |
|                      | Débit total                       | p100           | 1    |   |   |   | 2 |    |    |    |    | 1  |    | ↗ |                   |
|                      |                                   | <p98           |      |   |   | 1 | 2 |    |    |    |    |    |    |   |                   |
|                      | Proportion débit E. Imbeaux/total | p100           |      | 1 |   |   | 1 |    | 1  |    |    |    |    | - |                   |
|                      |                                   | <p98           |      |   |   |   | 1 |    |    |    |    |    |    |   |                   |
|                      | Nb coupures                       | p100           |      |   | 1 |   |   |    |    |    |    |    |    | ↗ |                   |
|                      |                                   | <p98           |      |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |   |                   |
|                      | Nb interventions                  | p100           |      |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | ↗ |                   |
|                      |                                   | <p98           | 1    |   | 1 |   |   | 1  |    | 1  |    |    |    |   |                   |

 Forme de la relation conforme à la tendance attendue.

 Forme de la relation partiellement conforme à la tendance attendue.

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

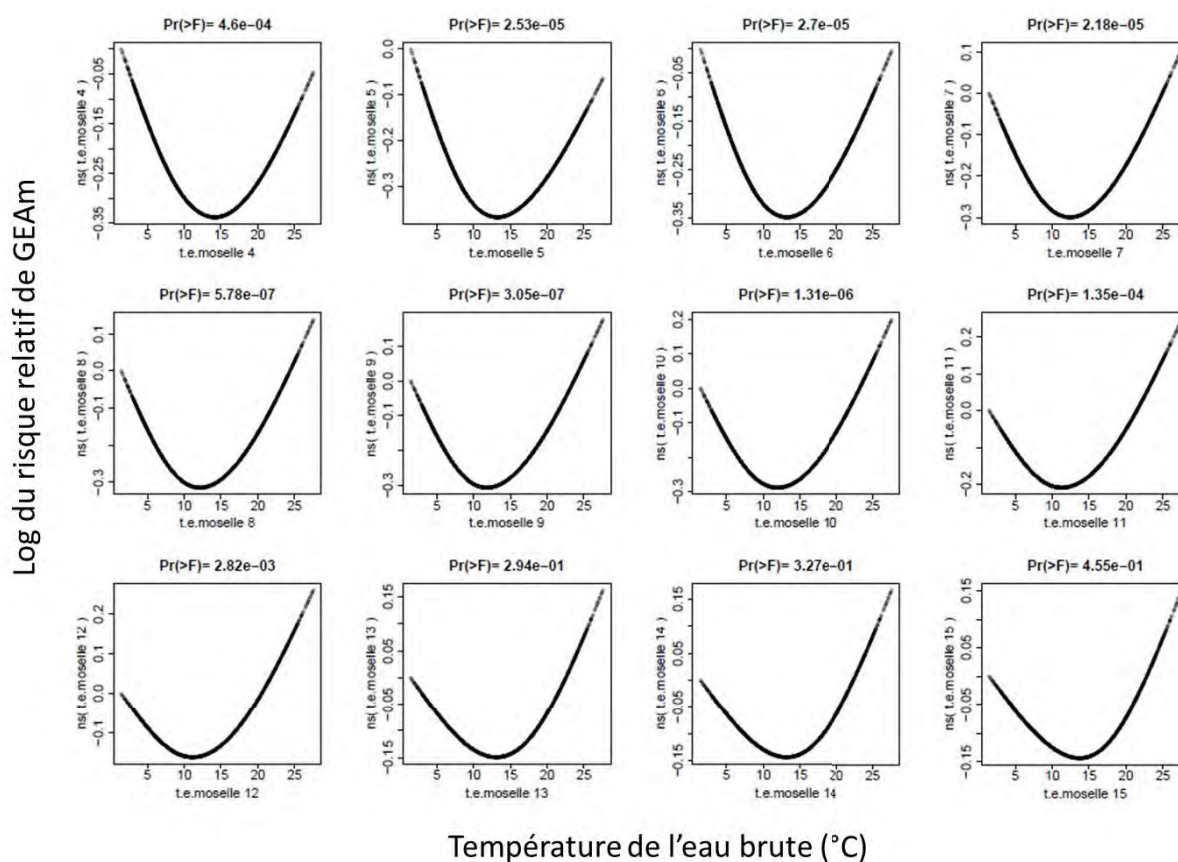
U\* : avec accentuation possible d'une branche ou de l'autre.

#### 4.4.1. Température de l'eau brute

La forme de la relation entre la température de l'eau de la Moselle et l'incidence des GEAm est stable sur l'ensemble des *lags* étudiés. Elle présente une forme en « U » conforme aux attentes. Le minimum est compris entre 10 et 15 °C (figure 10). Les associations sont significatives du *lag* 4 au *lag* 12 ( $p < 0,05$ ). La suppression des valeurs extrêmes, supérieures à 25,3 °C (p98), ne modifie ni la forme des relations, ni la significativité des associations.

Figure 10

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 du secteur d'étude en fonction de la température de l'eau brute (Moselle), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

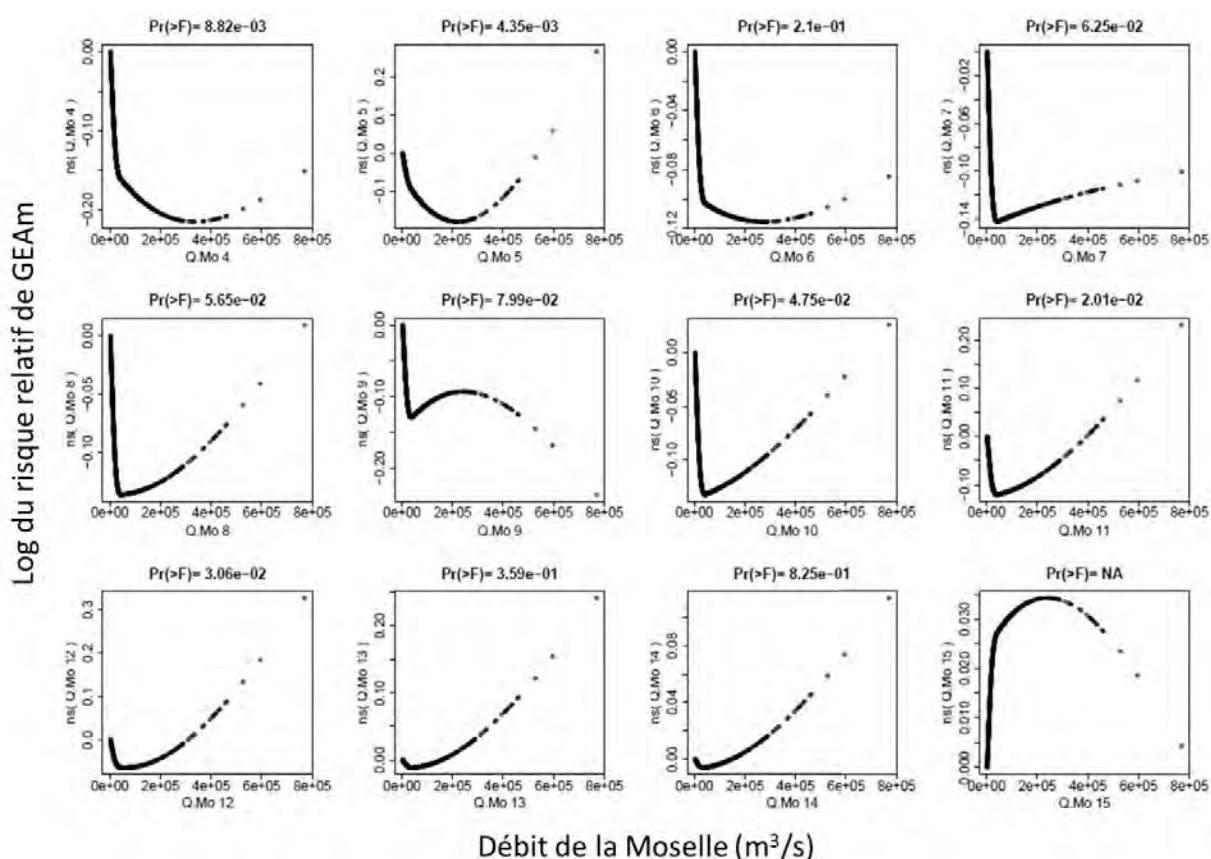


#### 4.4.2. Débit de la Moselle

La forme de la relation entre le débit de la Moselle et l'incidence des GEAm est stable entre les *lags* 4 et 14. Elle présente une forme en « U » avec un minimum compris entre 100 et 200 m<sup>3</sup>/s (figure 11). Les associations aux *lags* 4 à 5 et 10 à 12 sont significatives ( $p < 0,05$ ). La suppression des valeurs extrêmes, supérieures à 237,2 m<sup>3</sup>/s (p98), ne modifie qu'à la marge la forme des relations et améliore la significativité des associations, notamment au *lag* 7 ( $p = 2,82 \cdot 10^{-2}$ ).

Figure 11

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 du secteur d'étude en fonction du débit de la Moselle ( $\times 10^3$ ), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

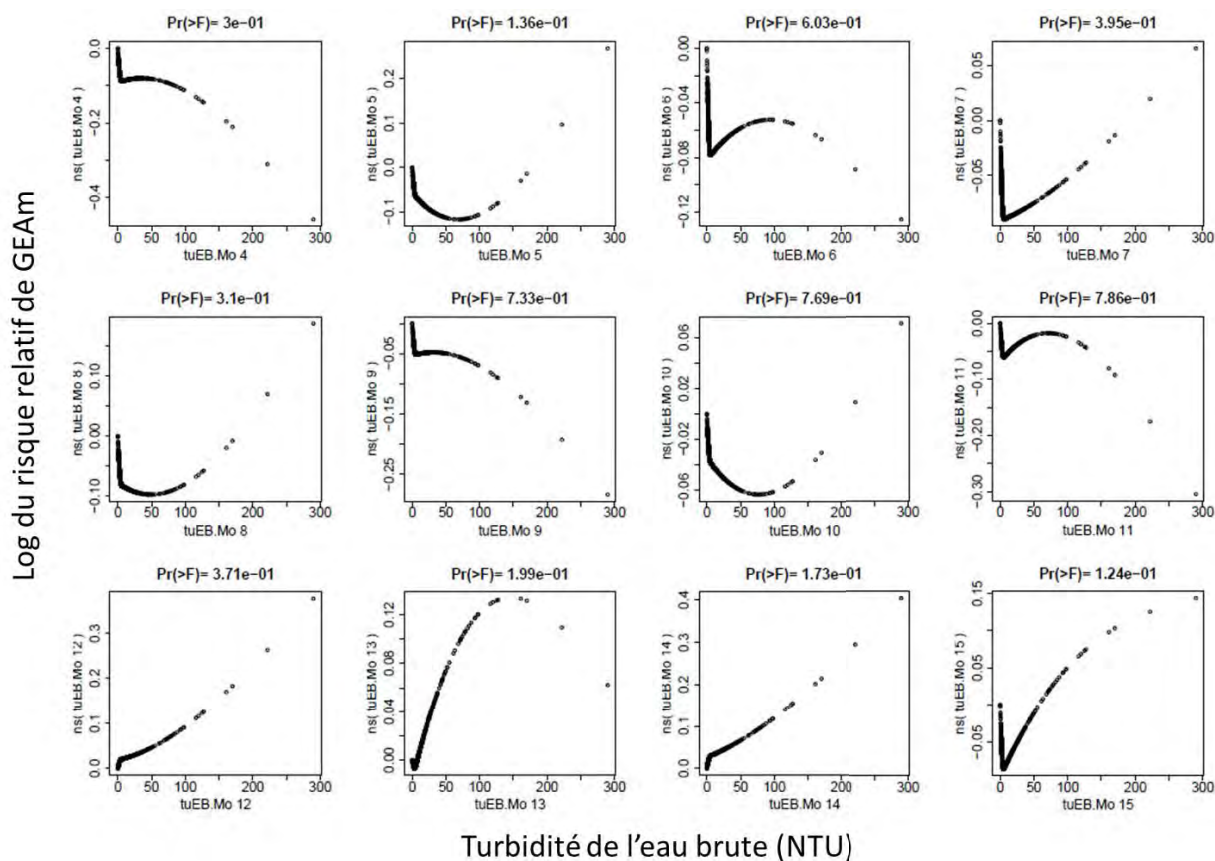


#### 4.4.3. Turbidité de l'eau brute

La relation entre la turbidité de l'eau de la Moselle et l'incidence des GEAm présente une partie stable entre les lags 4 et 11 qui est décroissante entre 0 et 5 NTU (figure 12). Au-delà de 5 NTU, la forme de la relation est variable et fortement influencée par les valeurs extrêmes de turbidité. Aucune association n'est significative ( $p > 0,05$ ). La suppression des valeurs supérieures à 44 NTU (p98) ne modifie ni la forme ni la stabilité de la relation entre 0 et 5 NTU et n'améliore que peu la significativité des associations.

Figure 12

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 du secteur d'étude en fonction de la turbidité de l'eau brute (Moselle), pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

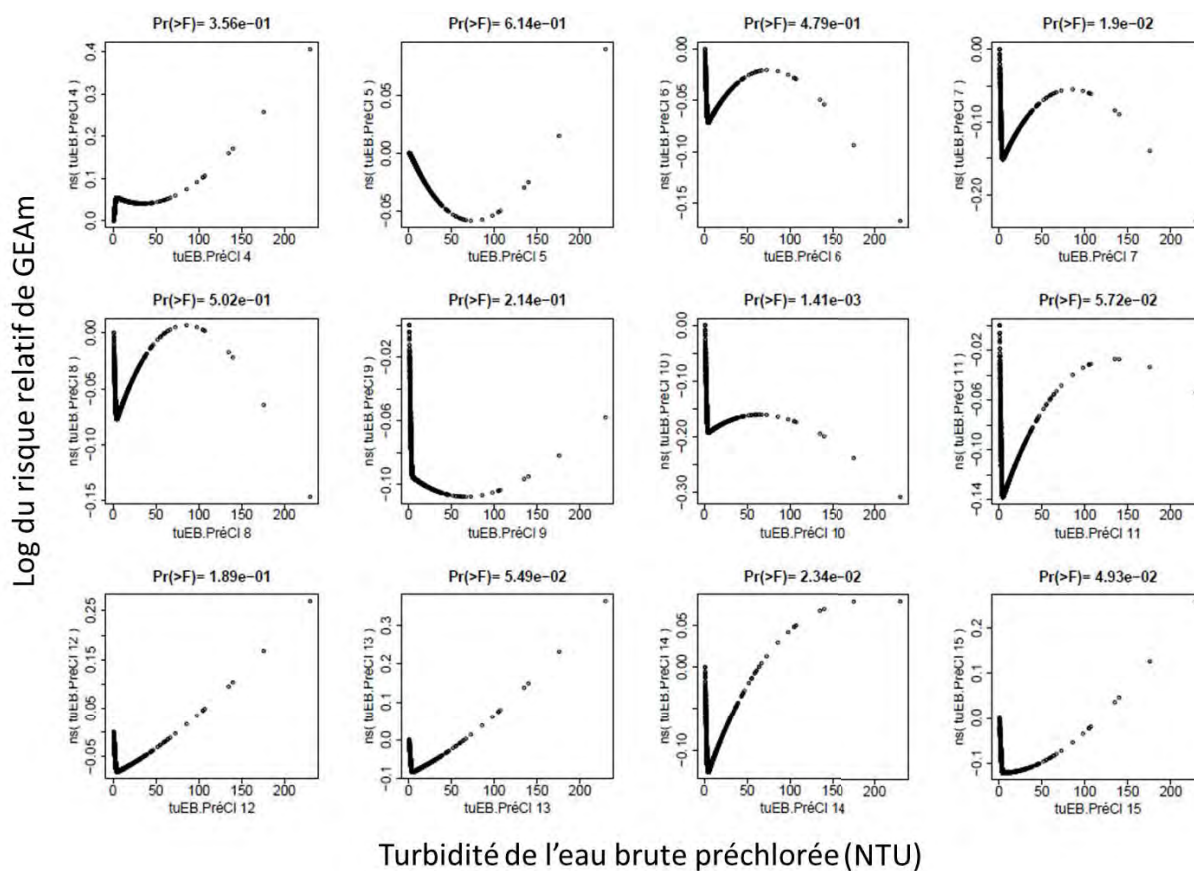


#### 4.4.4. Turbidité de l'eau brute préchlorée

Les relations entre la turbidité de l'eau brute préchlorée et l'incidence des GEAm sont similaires à celles observées avec l'eau brute. On retrouve une cassure à 5 NTU (excepté au lag 5) avec une partie de la relation stable et décroissante entre 0 et 5 NTU (figure 13), puis variable au-delà et fortement influencée par les valeurs extrêmes de turbidité. Les associations aux lags 7, 10, 14 et 15 sont significatives ( $p < 0,05$ ). La suppression des valeurs supérieures à 37 NTU ( $p_{98}$ ) ne modifie pas la partie comprise entre 0 et 5 NTU. Seule l'association au lag 7 reste significative ( $p = 1,86 \cdot 10^{-2}$ ).

Figure 13

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 du secteur d'étude en fonction de la turbidité de l'eau brute préchlorée, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

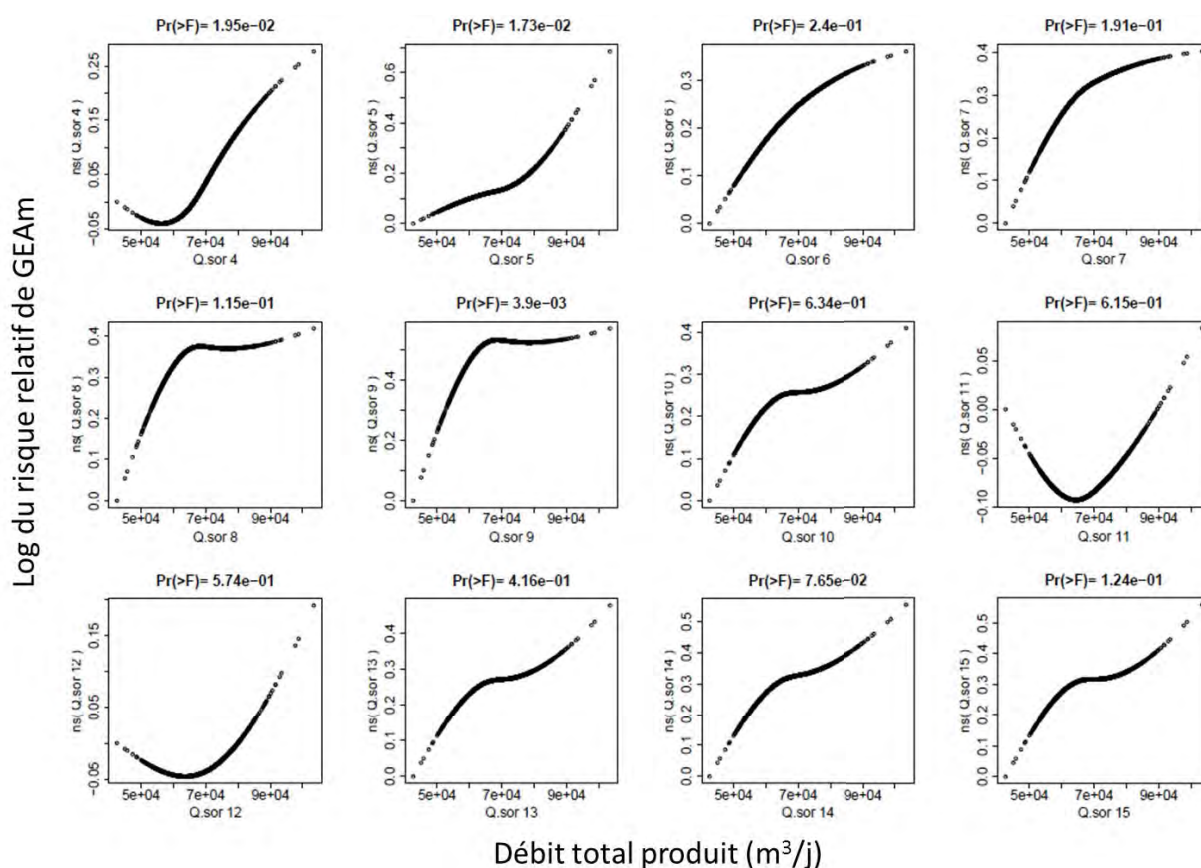


#### 4.4.5. Débit total produit

La relation entre le débit total produit et l'incidence des GEAm présente une forme globalement stable et croissante sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 14). Seules les associations aux *lags* 4, 5 et 9 sont significatives. La suppression des valeurs supérieures à 84 410 m<sup>3</sup>/j (p98) ne modifie que très peu la forme des relations à leurs extrémités.

Figure 14

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 du secteur d'étude en fonction du débit total produit par les usines E. Imbeaux et St-Charles, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

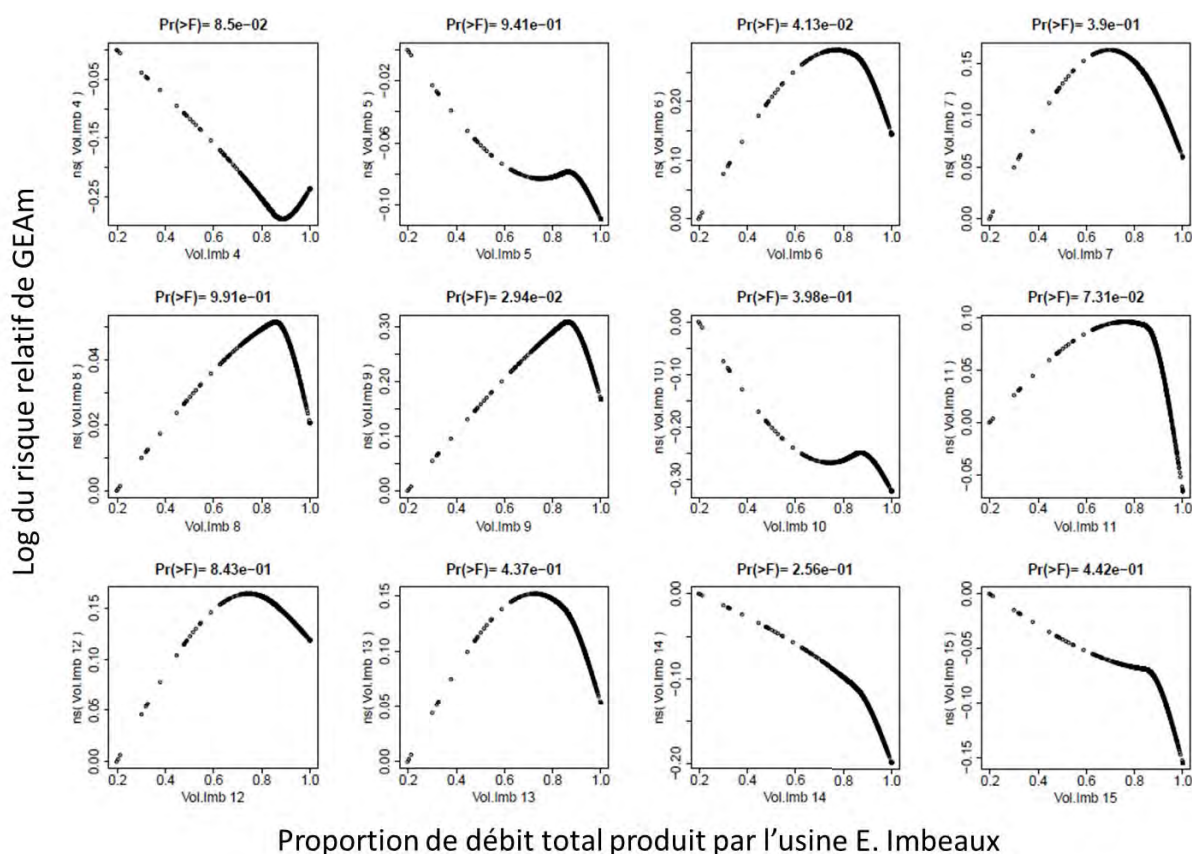


#### 4.4.6. Proportion de débit produit par l'usine E. Imbeaux

La relation entre la proportion du débit total produit par l'usine E. Imbeaux et l'incidence des GEAm présente une partie stable et décroissante entre 0,9 et 1,0, à partir du *lag* 5 (figure 15). Seules les associations aux *lag* 6 et 9 sont significatives ( $p < 0,05$ ). Entre 0,2 et 0,9, le sens de la relation est variable selon le *lag* considéré.

Figure 15

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 en fonction de la proportion de débit total produite par l'usine E. Imbeaux, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

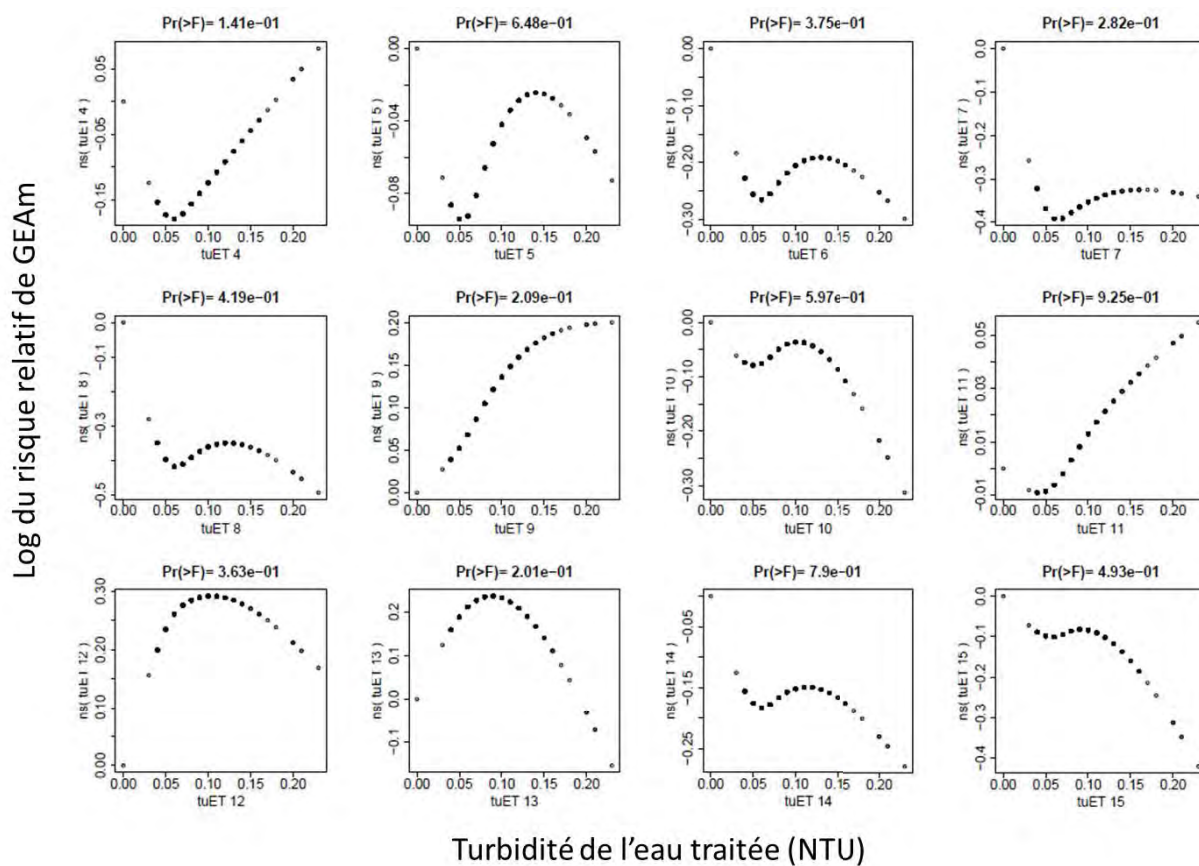


#### 4.4.7. Turbidité de l'eau traitée

La relation entre la turbidité de l'eau traitée et l'incidence des GEAm présente une partie croissante entre 0,05 et 0,10 NTU qui est stable sur l'ensemble des *lags* étudiés (figure 16). Avant 0,05 NTU et au-delà de 0,10 NTU, la forme de la relation est variable selon le *lag* considéré. Aucune association n'est significative ( $p > 0,05$ ). La suppression des valeurs de turbidité supérieures à 0,13 NTU (p98) ne modifie pas le sens de la relation entre 0,05 et 0,10 NTU pour les *lags* inférieures à 14. Aucune association ne devient significative.

Figure 16

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 en fonction de la turbidité de l'eau traitée par l'usine E. Imbeaux, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

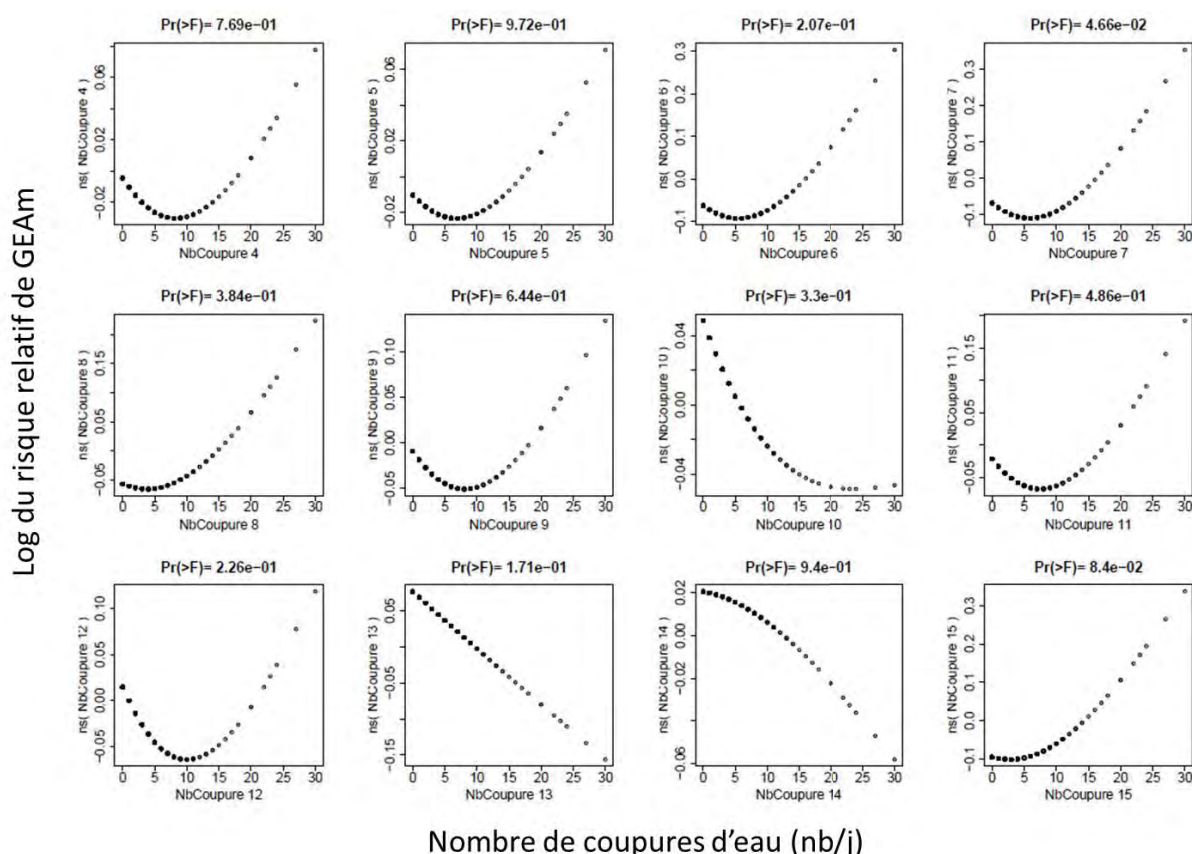


#### 4.4.8. Nombre de coupures d'eau sur le réseau

La relation entre le nombre de coupures d'eau sur le réseau et l'incidence des GEAm présente une forme en « U » stable sur les lags 4 à 9, puis 11, 12 et 15 (figure 17). Le minimum est observé entre 5 et 10 interventions par jour. Seule l'association au lag 7 est significative ( $p=4,66.10^{-2}$ ). La suppression des valeurs supérieures à 9 (p98) supprime les branches croissantes des relations qui deviennent alors majoritairement décroissantes. La significativité des associations s'en trouve dégradée.

Figure 17

Variation du risque de GEAm (log RR) chez les 1-15 en fonction du nombre de coupures d'eau sur le réseau de distribution, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007

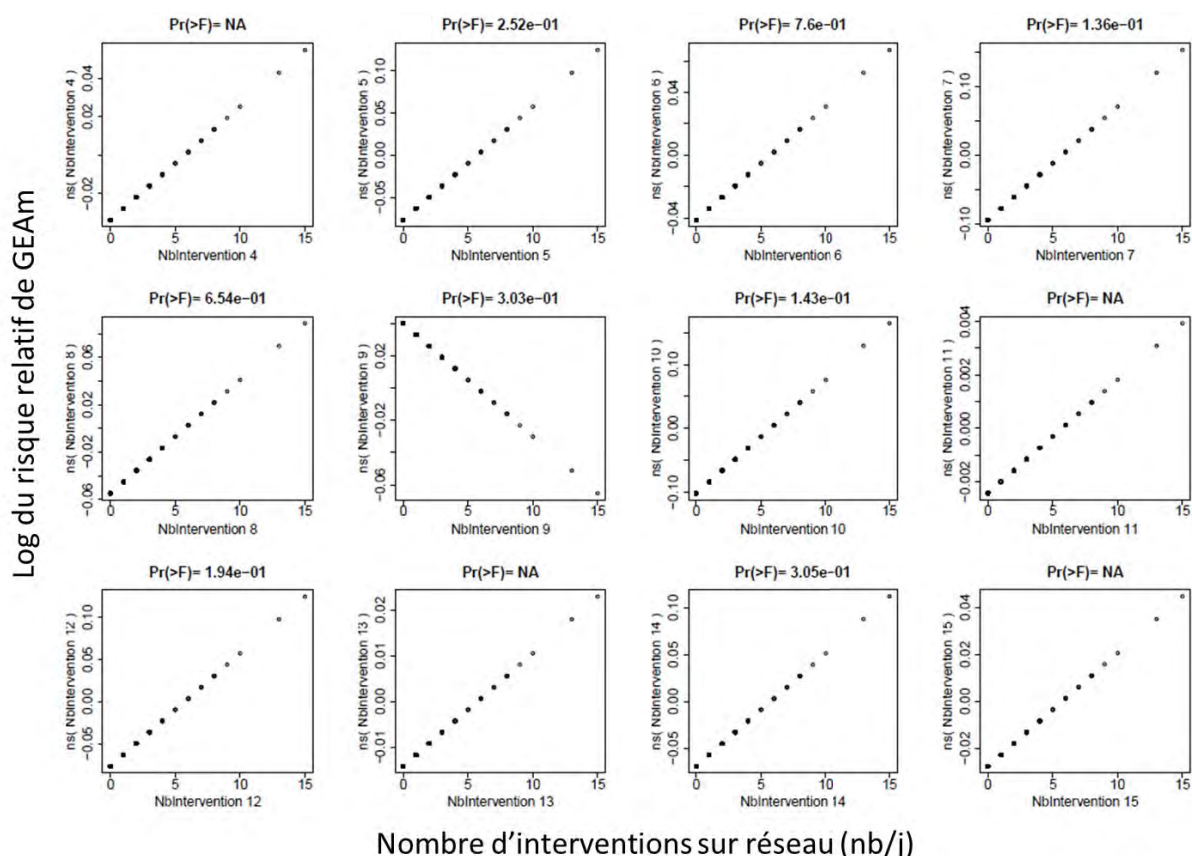


#### 4.4.9. Nombre d'interventions sur le réseau

Les relations entre le nombre d'interventions sur le réseau et l'incidence des GEAM sont stables, linéaires et croissantes sur l'ensemble des *lags* étudiés, excepté au *lag* 9 (figure 18). Aucune association n'est significative ( $p < 0,05$ ). La suppression des valeurs supérieures à 3 (p98) conserve le sens de l'ensemble des relations, même au *lag* 9, et rend significative les associations aux *lags* 7 ( $p = 1,51 \cdot 10^{-2}$ ), 10 ( $p = 1,46 \cdot 10^{-2}$ ) et 12 ( $p = 3,94 \cdot 10^{-2}$ ).

Figure 18

Variation du risque de GEAM (log RR) chez les 1-15 en fonction du nombre d'interventions sur le réseau de distribution, pour des latences de l'effet entre 4 et 15 jours, 2002-2007



## 4.5. Modélisation multi-exposition

### 4.5.1. Construction du modèle

Les variables d'exposition incluses dans le modèle final ont été choisies sur la base des résultats de l'analyse des facteurs de risques des GEAm (tableau 6). Au vu de ces résultats, les turbidités de l'eau brute et de l'eau préchlorée n'ont pas été retenues pour la modélisation multi-exposition. Seule la turbidité de l'eau traitée a été incluse dans le modèle multi-exposition.

**Tableau 6**

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

| Variables            |                                         | Stabilité | Significativité | Robustesse | Tendance conforme | Inclusion dans le modèle final |
|----------------------|-----------------------------------------|-----------|-----------------|------------|-------------------|--------------------------------|
| Eau brute            | Turbidité                               | oui       | non             | non        | non               | non                            |
|                      | Débit Moselle                           | oui       | oui             | oui        | oui               | oui                            |
| Eau brute préchlorée | Turbidité                               | oui       | non             | oui        | partielle         | non                            |
| Eau produite         | Turbidité                               | oui       | non             | oui        | partielle         | oui                            |
|                      | Débit total                             | oui       | partielle       | oui        | oui               | oui                            |
|                      | Débit E. Imbeaux                        | oui       | non             | oui        | oui               | non                            |
|                      | Débit St-Charles                        | oui       | partielle       | non        | oui               | non                            |
|                      | Proportion débit E. Imbeaux/débit total | oui       | partielle       | oui        | -                 | non                            |
|                      | Nb coupures                             | partielle | non             | non        | oui               | non                            |
|                      | Nb interventions                        | oui       | non             | oui        | oui               | non                            |

Les variables débit de l'eau brute et débit total produit présentent les qualités pour être introduites dans le modèle multi-exposition. Au vu des résultats acquis dans les précédents volets de l'étude [9;10], le débit total produit a été inclus sous forme linéaire et le débit de l'eau brute sans contrainte de linéarité. Les débits de chaque usine, redondants avec la variable « débit total produit », n'ont pas été retenus.

La forme de la relation entre la proportion de débit produit par l'usine E. Imbeaux et l'incidence des GEAm, ainsi que la non-significativité de l'association sur une moyenne des *lags* 5 à 7, ont conduit à éliminer cette variable pour la modélisation multi-exposition.

En forçant leur linéarité, les variables nombre de coupures d'eau et nombre d'interventions sur le réseau, moyennées sur les *lags* 5 à 7, ne sont pas significatives. Les essais de modélisation mono-exposition incluant ces variables sans contrainte de linéarité n'ont pas permis de montrer des relations de forme convaincante (croissante). De plus, les variations observées dans les décomptes de ces variables laissent suspecter des variations de définitions au cours des années de collecte. Ces deux variables n'ont donc pas été introduites dans le modèle multi-exposition.

*In fine*, le modèle multi-exposition testé contient les variables « débit total produit », « débit de la Moselle », « turbidité de l'eau traitée » et « température de l'eau ». Les résultats acquis dans le précédent volet de l'étude [11], montrant un effet modificateur de la température sur le risque de

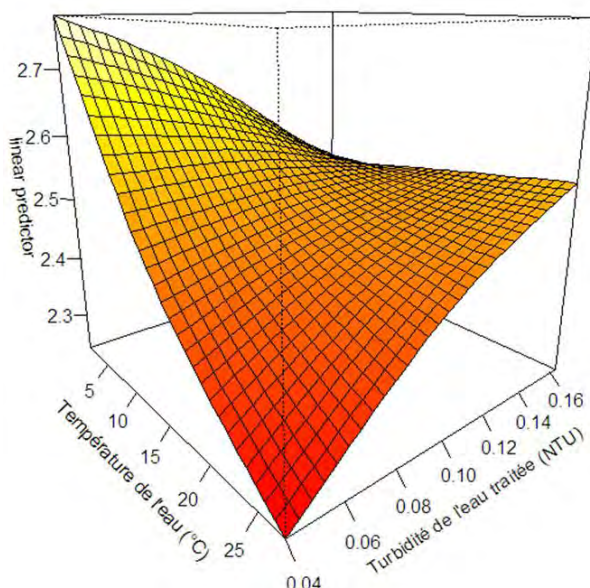
GEAm lié à l'eau, nous ont amenés à introduire la turbidité de l'eau et la température de l'eau brute sous la forme d'une interaction.

#### 4.5.2. Modélisation chez les enfants

Aux faibles températures de l'eau de la Moselle, le risque de GEAm lié à la turbidité de l'eau traitée apparaît décroissant (figure 19). Au-delà de 15 °C, le sens de la courbe s'inverse et le risque de GEAm augmente proportionnellement à la turbidité. La relation entre le risque de GEAm et l'interaction turbidité/température est significative ( $p=0,035$ ). Le risque de GEAm lié à une augmentation interquartile de la turbidité, de 0,06 à 0,08 NTU, est de 1,037 [0,980–1,096] lorsque la température de l'eau est de 18,8 °C (p75). À la température de 7,7 °C (p25), le risque de GEAm lié à une augmentation de la turbidité est de 0,990 [0,934–1,050].

Figure 19

Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans sur le secteur de Nancy en fonction de la turbidité de l'eau traitée et de la température de l'eau brute à Messein, modélisation multi-exposition (2002-2007)



La relation entre le débit de la Moselle et l'incidence des GEAm s'apparente à une forme en « U » plutôt aplatie et dissymétrique (figure 20) avec un minimum situé autour du débit médian (30 m<sup>3</sup>/s). L'association n'est pas significative ( $p=0,51$ ).

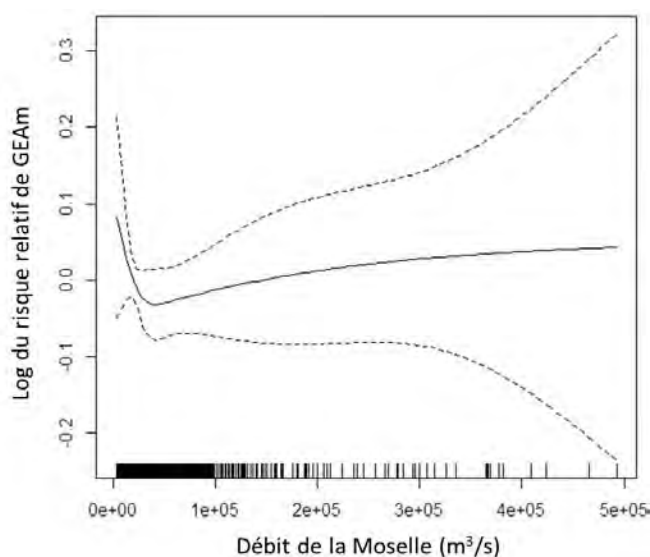
Le débit produit est associé significativement à l'incidence des GEAm ( $p=3,9.10^{-4}$ ). La relation est croissante. Le risque de GEAm associé à une variation interquartile du débit produit est de 1,012 [1,005–1,019].

#### 4.5.3. Test du modèle chez les adultes

Dans le but de valider les résultats obtenus chez les moins de 16 ans, le modèle multi-exposition retenu a été reproduit sur les adultes en incluant les mêmes variables, leur formulation (linéaire, *spline*, tenseur) et le même paramétrage.

Figure 20

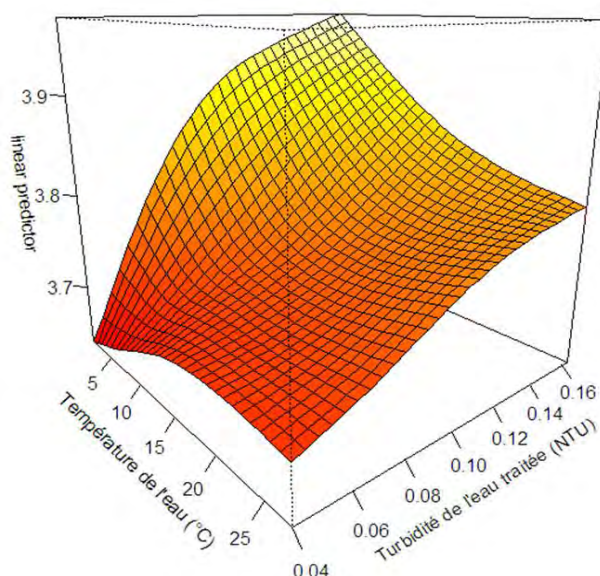
Variation du risque de GEAm chez les 1-15 ans sur le secteur de Nancy en fonction du débit de la Moselle à Messein, modélisation multi-exposition (2002-2007)



Aux faibles températures de l'eau, la relation entre la turbidité de l'eau traitée et le risque de GEAm est fortement croissante (figure 21), contrairement à ce qui était observé chez les enfants (figure 19). Au-delà de 15 °C, la relation conserve un sens croissant mais moins prononcé (figure 21). L'association n'est pas significative ( $p=0,17$ ). Le risque de GEAm lié à une augmentation interquartile de la turbidité, de 0,06 à 0,08 NTU, est de 1,047 [1,005–1,091] lorsque la température de l'eau est de 7,7 °C ( $p_{25}$ ). À la température de 18,8 °C ( $p_{75}$ ), le risque de GEAm lié à une augmentation de la turbidité est de 1,015 [0,973–1,059].

Figure 21

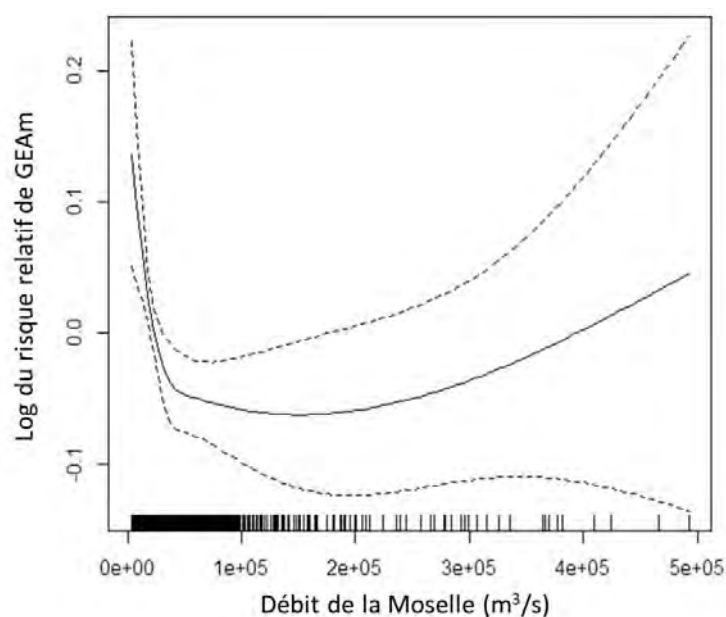
Variation du risque de GEAm chez les 16 ans et plus sur le secteur de Nancy en fonction de la turbidité de l'eau traitée et de la température de l'eau brute à Messein, modélisation multi-exposition (2002-2007)



Contrairement à ce qui a été observé chez les enfants, l'association entre le débit de la Moselle et l'incidence des GEAm est significative ( $p=0,007$ ). La relation présente une forme en « U » dissymétrique (figure 22) avec une partie très fortement décroissante entre le minimum (3 130  $\text{m}^3/\text{s}$ ) et le débit médian (30 000  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Figure 22

Variation du risque de GEAm chez les 16 ans et plus sur le secteur de Nancy en fonction du débit de la Moselle à Messein, modélisation multi-exposition (2002-2007)



La relation entre le débit produit et l'incidence des GEAm est décroissante. L'association n'est pas significative ( $p=0,29$ ). Le risque associé à une variation interquartile du débit produit est de 0,998 [0,993–1,002].

## 5. Discussion

Le présent rapport est le neuvième et dernier volet de l'étude turbidité et gastro-entérites. La méthodologie statistique et la qualité des données sanitaires utilisées ont été discutées lors des premiers volets de l'étude [12;13] et ne seront pas rediscutées ici. Ainsi, la discussion porte sur les variables incluses dans le modèle multi-exposition, à savoir le débit de la ressource, le débit produit, la turbidité et la température de l'eau. Un bilan des connaissances acquises sur les sites alimentés par une eau de rivière est présenté en fin de discussion.

### 5.1. Débit de la ressource

La relation entre le débit de la Moselle et le risque de GEAm sur le secteur de Nancy ne présente pas de relation franche chez les enfants et une forme en « U » très dissymétrique avec une branche décroissante particulièrement marquée chez les adultes. Ce résultat, cohérent avec des résultats déjà acquis [10-12], confirme que les périodes d'étiage présentent un risque accru de GEAm liée à l'eau distribuée, possiblement lié à un effet de concentration des rejets ponctuels d'eaux usées. La zone située en amont de la prise d'eau est rurale sur environ 60 km jusqu'à la commune d'Epinal.

### 5.2. Débit produit

Comme sur les sites du Syndicat des eaux d'Ile-de-France (Sedif), de Nantes [12] et de Paris-Est [10], les résultats montrent un lien significatif et positif entre le débit produit et le risque de GEAm chez les enfants, sans que ces résultats puissent être reproduits chez les adultes. L'augmentation de 12 % du risque lié à une variation interquartile du débit produit à Nancy est toutefois nettement inférieure à ce qui a pu être observé ailleurs, de 44 % sur le site du Sedif-Est à 67 % sur le site du Sedif-Nord.

Pour augmenter la production quotidienne d'eau, les exploitants disposent de plusieurs stratégies comme l'accroissement de la vitesse de clarification ou de filtration de l'eau, la mise en service d'équipements de filière supplémentaires ou encore l'élargissement de la plage horaire de fonctionnement de l'usine si celle-ci n'est pas continue. Bien que les objectifs de qualité restent identiques quel que soit l'objectif fixé de quantité d'eau produite, il est possible que l'accroissement de la vitesse de traitement puisse contribuer à une légère dégradation de la qualité de l'eau. La non-reproductibilité du résultat chez les adultes invite toutefois à rester prudent sur la vraisemblance du risque observé chez les enfants.

### 5.3. Turbidité et température de l'eau traitée

Les résultats montrent une tendance croissante du risque de GEAm lorsque la turbidité de l'eau produite augmente entre 0,06 NTU et 0,08 NTU, sans que cet effet soit significatif.

La recherche de facteurs de risques supplémentaires a permis de mettre en évidence l'effet modificateur de la température de l'eau sur la relation entre turbidité et risque de GEAm. Cet effet avait déjà pu être observé sur le nombre de particules sur un des 3 sites de la banlieue parisienne étudiés précédemment [11], avec une accentuation du risque aux fortes températures. Dans le cas de Nancy, l'association observée entre la turbidité aux faibles températures et le risque de GEAm chez

les enfants n'a pas pu être reproduite chez les adultes. Le risque est croissant et significatif chez les adultes alors qu'il est décroissant et non significatif chez les enfants. Aux fortes températures de l'eau, l'effet observé chez les enfants a pu être reproduit chez les adultes, avec un niveau de risque deux fois moindre chez les adultes (1,015 vs 1,037). Cette variation du niveau de risque entre adultes et enfants va dans le sens des résultats qui ont été observés sur le site de Paris-Est [10;12].

## 5.4. Bilan sur les sites alimentés par une eau de rivière

Le secteur de Nancy dispose d'une ressource superficielle pour son alimentation en eau comme plusieurs sites étudiés précédemment. Les filières de traitement de ces sites sont dites « complètes » et comprennent les étapes successives de clarification (coagulation-floculation-décantation, filtration sur sable lente ou rapide) et désinfection (tableau 7). Mis à part l'étape de pré-chloration spécifique au site de Nancy, la filière de traitement est similaire à ce qui a été rencontré sur les sites de Nantes [12], et les secteurs Sedif-Est et Sedif-Sud [11]. Les variables disponibles sont également très proches. Des étapes de traitements supplémentaires comme l'ultrafiltration sur le site du Sedif-Nord ou la filtration lente à Paris-Est rendent la comparaison directe des risques moins pertinente en dépit de ressources de même nature (eaux de rivières anthropisées).

Sur l'ensemble des ressources étudiées, la Moselle se place dans la moyenne en terme de contamination par les *E.Coli* (2 018/100 ml). Elle présente une meilleure qualité si l'on considère le paramètre entérocoques (329/100 ml). Seule la Loire à Nantes présente une meilleure qualité sur ces deux paramètres microbiologiques (tableau 7).

Lorsqu'ils sont significatifs, les niveaux de risque interquartile associés à la turbidité ou aux particules varient entre 2,2 % et 12,1 % selon le site étudié. Les interactions entre divers facteurs de risques semblent montrer que le risque serait en tendance plus marqué aux fortes températures de l'eau ou lorsque le débit de la ressource est plus faible (tableau 7) mais des risques significatifs peuvent aussi être observés en crue [14]. Le site de Nancy est particulier dans la mesure où le risque n'apparaît qu'aux fortes températures, comme sur le site du Sedif-Sud, mais n'est ni significatif, ni reproductible chez les adultes, contrairement au site du Sedif-Sud.

La non-reproductibilité des résultats chez les adultes apparaît systématique sur l'ensemble des sites étudiés sur la variable débit total produit. Les niveaux de risques observés sont cohérents d'un site à l'autre (tableau 7) mais les plages des intervalles de confiance restent assez larges. Plusieurs pistes d'explications peuvent être avancées pour expliquer l'effet d'une augmentation de la production d'eau sur le risque de GEAm. Toutefois, la non-reproductibilité de ces risques chez les adultes invite à rester prudent sur ces explications.

Le débit de la ressource n'est jamais lié significativement en tendance linéaire (risque interquartile) à une augmentation du risque de GEAm, ce qui permet de supposer une bonne efficacité globale ou une bonne adaptabilité des traitements opérés par les usines étudiées. Cette variable apparaît néanmoins intéressante dans la mesure où elle a permis d'identifier les zones critiques de production que sont les périodes d'étiages et de crues (risque associé à des variations entre des percentiles décentrés comme p10-p50 ou p50-p90). Une vigilance accrue doit être observée par les exploitants durant ces périodes afin de maintenir une qualité de l'eau produite qui soit optimale.

Tableau 7

Comparaison des sites utilisant une ressource superficielle et étudiés dans le cadre de l'étude T&G et niveaux de risque observés

| Sites                                                                            |                                                                          |                                                                          |                                    |                                                 |                                                                          |                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                  | Nancy                                                                    | Nantes                                                                   | Paris-Est                          | Sedif-Nord                                      | Sedif-Est                                                                | Sedif-Sud                                                                |
| Qualité moyenne de la ressource                                                  |                                                                          |                                                                          |                                    |                                                 |                                                                          |                                                                          |
| [E. Coli/100 ml]                                                                 | 2 018                                                                    | 420                                                                      | 6 212                              | 1 603                                           | 4 077                                                                    | 1 580                                                                    |
| [Entérocoques/100 ml]                                                            | 329                                                                      | 294                                                                      | 1 400                              | 929                                             | 944                                                                      | 795                                                                      |
| Filière de traitement                                                            |                                                                          |                                                                          |                                    |                                                 |                                                                          |                                                                          |
| Prétraitement                                                                    | Dégrillage<br>Tamisage<br>Pré-Chloration                                 | Débouage<br>Pré-Ozonation<br>Dégrillage                                  | Dégrillage<br>Pré-Ozonation        | Dégrillage<br>Débouage                          | Dégrillage<br>Tamisage                                                   | Dégrillage<br>Tamisage<br>Pré-Ozonation                                  |
| Clarification                                                                    | Décantation                                                              | Coagulation<br>Floculation<br>Décantation                                | Préfiltration sur<br>biolite/sable | Coagulation<br>Floculation<br>Décantation       | Coagulation<br>Floculation<br>Décantation                                | Coagulation<br>Floculation<br>Décantation                                |
| Filtration                                                                       | Rapide sur sable<br>CAG                                                  | Rapide sur sable<br>CAG                                                  | Lente sur sable                    | Rapide sur sable<br>1) CAG<br>2) Nanofiltration | Rapide sur sable<br>CAG                                                  | Rapide sur sable<br>CAG                                                  |
| Désinfection                                                                     | Chloration                                                               | Ozonation<br>Chloration                                                  | Ozonation<br>Chloration            | 1) Ozonation/Chloration<br>2) U.V.              | Ozonation<br>Chloration                                                  | Ozonation<br>Chloration                                                  |
| Risques interquartiles pour les 0-15 ans et intervalle de confiance à 95 %       |                                                                          |                                                                          |                                    |                                                 |                                                                          |                                                                          |
| Débit Ressource                                                                  | 0,947 [0,862–1,040]                                                      | 0,955 <sup>(3)</sup> [0,888–1,027]<br>0,924 <sup>(4)</sup> [0,864–0,988] | 0,933 [0,868–1,004]                | 0,920 [0,860–0,984]                             | 0,964 <sup>(1)</sup> [0,930–0,999]<br>0,826 <sup>(2)</sup> [0,775–0,881] | 0,936 [0,892–0,982]                                                      |
| Turbidité*                                                                       | 0,990 <sup>(1)</sup> [0,934–1,050]<br>1,037 <sup>(2)</sup> [0,980–1,096] | 1,022 <sup>(5)</sup> [0,989–1,056]<br>0,997 <sup>(6)</sup> [0,964–1,031] | 1,081 [1,009–1,158]                | 1,121 [1,075–1,170]                             | ns                                                                       | 0,997 <sup>(1)</sup> [0,972–1,023]<br>1,094 <sup>(2)</sup> [1,055–1,134] |
| Débit Produit                                                                    | 1,012 [1,005–1,019]                                                      | 1,111 [1,056–1,169]                                                      | nd                                 | 1,150 [1,098–1,204]                             | 1,044 [1,027–1,061]                                                      | 1,067 [1,045–1,088]                                                      |
| Risques interquartiles pour les 16 ans et plus et intervalle de confiance à 95 % |                                                                          |                                                                          |                                    |                                                 |                                                                          |                                                                          |
| Débit Ressource                                                                  | 0,899 [0,846–0,956]                                                      | 0,951 <sup>(3)</sup> [0,880–1,027]<br>0,994 <sup>(4)</sup> [0,924–1,070] | 0,935 [0,882–0,990]                | 0,941 [0,884–1,002]                             | 0,965 <sup>(1)</sup> [0,932–0,998]<br>0,909 <sup>(2)</sup> [0,854–0,968] | 0,937 [0,896–0,980]                                                      |
| Turbidité*                                                                       | 1,047 <sup>(1)</sup> [1,005–1,091]<br>1,015 <sup>(2)</sup> [0,973–1,059] | 1,012 <sup>(5)</sup> [0,980–1,046]<br>1,046 <sup>(6)</sup> [1,011–1,083] | 1,056 [1,000–1,115]                | 1,085 [1,043–1,129]                             | ns                                                                       | 1,005 <sup>(1)</sup> [0,978–1,032]<br>1,053 <sup>(2)</sup> [1,014–1,093] |
| Débit Produit                                                                    | 0,998 [0,993–1,002]                                                      | 0,987 [0,943–1,033]                                                      | nd                                 | 1,035 [0,994–1,079]                             | 1,002 [0,988–1,016]                                                      | 1,002 [0,984–1,020]                                                      |

ns=non significatif ; nd=non disponible ; \* particules sur les sites du Sedif-Nord, Sedif-Est et Sedif-Sud.

<sup>(1)</sup> θ °C eau fixée à p25 ; <sup>(2)</sup> θ °C eau fixée à p75 ; <sup>(3)</sup> turbidité fixée à p25 ; <sup>(4)</sup> turbidité fixée à p75 ; <sup>(5)</sup> débit ressource fixé à p25 ; <sup>(6)</sup> débit ressource fixé à p75.

## 6. Conclusion

Les résultats de ce volet de l'étude n'ont pas permis de mettre en évidence un effet significatif de la turbidité de l'eau produite sur le risque de GEAm bien que la relation observée montre une tendance croissante du risque lorsque la turbidité de l'eau produite augmente de 0,06 à 0,08 NTU à la sortie de l'usine.

Comme sur les secteurs du Sedif [11], la température de l'eau joue un rôle modificateur sur l'expression des risques qu'il est important de prendre en compte. Ainsi, à Nancy, la turbidité ne jouerait un rôle significatif sur le risque de GEAm lié à l'eau du robinet qu'aux fortes températures de l'eau. Ce résultat n'a toutefois pas pu être reproduit chez les adultes.

L'étude exploratoire a permis de construire un modèle multi-exposition plausible (variables incluses et formes des relations conformes à l'attente), mais peu robuste car non-transposable des enfants aux adultes, sans qu'aucune contradiction n'apparaissent toutefois.

Pour la poursuite de ce type d'étude, il conviendrait de recueillir systématiquement les conditions d'exploitation des usines de production d'eau et les choix stratégiques de l'exploitant afin de permettre une meilleure interprétation des résultats.

# 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 gastro-enteritis 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* 2011.
- [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] 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).
- [8] Haas CN, Rose JB, Gerba CP. Quantitative microbial risk assessment. New York: John Wiley & Sons; 1999. 449 p.
- [9] 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, France : Institut de veille sanitaire, 2013. 44 p.
- [10] Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M, Beaudeau P. Qualité de l'eau distribuée à Paris-Est et incidence des gastro-entérites aiguës, 2002-2007. Saint-Maurice, France : Institut de veille sanitaire, 2014. 45 p.
- [11] Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M, Beaudeau P. Qualité de l'eau distribuée en banlieue parisienne et incidence des gastro-entérites aiguës, 2002-2007. Saint-Maurice, France : Institut de veille sanitaire, 2015. 85 p.
- [12] Beaudeau P, Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M. Qualité de l'eau distribuée à Nantes et incidence des gastro-entérites aiguës. Saint-Maurice, France : Institut de veille sanitaire, 2012. 47 p.
- [13] 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.
- [14] Beaudeau P, Zeghnoun A, Corso M, Lefranc A, Rambaud L. A time series study of gastroenteritis and tap water quality in the Nantes area, France, 2002-2007. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2014;24(2):192-9.

# Annexes

## Annexe 1 – 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
+fevrier+ete+noel+paques+toussaint+Q.sor57_100+te(t.e.moselle57,tuET
57)+s(Q.Mo57,bs="cr",fx=TRUE,k=4),family=quasipoisson,data=nancy,
na.action=na.omit,sp=c(800,120,120),subset=trend > 31)
```

**Family:** quasipoisson

**Link function:** log

### Formula:

```
spell14 ~ s(trend, k = 100, bs = "cr", fx = FALSE) + dowf + j.feries
+ ete + fevrier + ete + noel + paques + toussaint + Q.sor57_100 +
te(t.e.moselle57, tuET57) + s(Q.Mo57, bs = "cr", fx = TRUE, k = 4)
```

### Parametric coefficients :

|              | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) | Signif |
|--------------|------------|------------|---------|----------|--------|
| (Intercept)  | -0.1242297 | 0.2515617  | -0.494  | 0.62152  |        |
| dowfjeudi    | 1.7986805  | 0.1154644  | 15.578  | < 2e-16  | ***    |
| dowflundi    | 2.0665051  | 0.1153359  | 17.917  | < 2e-16  | ***    |
| dowfmardi    | 1.8110326  | 0.1157802  | 15.642  | < 2e-16  | ***    |
| dowfmercredi | 1.5381601  | 0.1163772  | 13.217  | < 2e-16  | ***    |
| dowfsamedi   | 1.0938754  | 0.1287166  | 8.498   | < 2e-16  | ***    |
| dowfvendredi | 1.8045077  | 0.1208477  | 14.932  | < 2e-16  | ***    |
| j.feries1    | -1.9428945 | 0.1529673  | -12.701 | < 2e-16  | ***    |
| etel         | -0.3043549 | 0.0632282  | -4.814  | 1.69e-06 | ***    |
| fevrier1     | -0.7114156 | 0.0765274  | -9.296  | < 2e-16  | ***    |
| noell        | -0.4042426 | 0.0662092  | -6.106  | 1.42e-09 | ***    |
| paques1      | -0.3455134 | 0.0683207  | -5.057  | 4.99e-07 | ***    |
| toussaint1   | -0.4791078 | 0.0900386  | -5.321  | 1.25e-07 | ***    |
| Q.sor57_100  | 0.0011873  | 0.0003337  | 3.558   | 0.00039  | ***    |

### Approximate significance of smooth terms :

|                          | edf    | Ref.df | F     | p-value |     |
|--------------------------|--------|--------|-------|---------|-----|
| s(trend)                 | 33.092 | 40.896 | 8.114 | <2e-16  | *** |
| te(t.e.moselle57,tuET57) | 3.894  | 4.575  | 2.486 | 0.0351  | *   |
| s(Q.Mo57)                | 3.000  | 3.000  | 0.762 | 0.5152  |     |

**R-sq. (adj) = 0.775      Deviance explained = 77.3%**

**GCV = 1.4266      Scale est. = 1.356      n = 1147**

**Signif. Codes :** \*\*\* p < 0.001  
\*\* p < 0.01  
\* p < 0.05  
. p < 0.1  
P < 1

## Annexe 2 – script R et paramètres du modèle multi-exposition utilisé chez les cas de GEAm adultes

```
mod.fit=gam(spe15p~s(trend,k=100,bs="cr",fx=FALSE)+dowf+j.feries+ete
+fevrier+ete+noel+paques+toussaint+Q.sor57_100+te(t.e.moselle57,tuET
57)+s(Q.Mo57,bs="cr",fx=TRUE,k=4),family=quasipoisson,data=nancy,
na.action=na.omit,sp=c(800,120,120),subset=trend > 31)
```

**Family:** quasipoisson

**Link function:** log

**Formula:**

```
spe15p ~ s(trend, k = 100, bs = "cr", fx = FALSE) + dowf + j.feries
+ ete + fevrier + ete + noel + paques + toussaint + Q.sor57_100 +
te(t.e.moselle57, tuET57) + s(Q.Mo57, bs = "cr", fx = TRUE, k = 4)
```

**Parametric coefficients:**

|              | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) | Signif |
|--------------|------------|------------|---------|----------|--------|
| (Intercept)  | 1.3697310  | 0.1699719  | 8.059   | 2.03e-15 | ***    |
| dowfjeudi    | 2.2339930  | 0.0906534  | 24.643  | < 2e-16  | ***    |
| dowflundi    | 2.6715730  | 0.0904796  | 29.527  | < 2e-16  | ***    |
| dowfmardi    | 2.4566374  | 0.0906401  | 27.103  | < 2e-16  | ***    |
| dowfmercredi | 2.2219984  | 0.0908628  | 24.454  | < 2e-16  | ***    |
| dowfsamedi   | 1.4155290  | 0.0984910  | 14.372  | < 2e-16  | ***    |
| dowfvendredi | 2.1920667  | 0.0936061  | 23.418  | < 2e-16  | ***    |
| j.feries1    | -2.3297653 | 0.1067593  | -21.823 | < 2e-16  | ***    |
| etel         | -0.0550252 | 0.0437609  | -1.257  | 0.208879 |        |
| fevrier1     | -0.1698871 | 0.0429317  | -3.957  | 8.08e-05 | ***    |
| noell        | 0.0567003  | 0.0362505  | 1.564   | 0.118081 |        |
| paques1      | -0.1566196 | 0.0414422  | -3.779  | 0.000166 | ***    |
| toussaint1   | -0.1691395 | 0.0514159  | -3.290  | 0.001036 | **     |
| Q.sor57_100  | -0.0002268 | 0.0002155  | -1.053  | 0.292776 |        |

**Approximate significance of smooth terms:**

|                          | edf    | Ref.df | F      | p-value | Signif |
|--------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| s(trend)                 | 43.146 | 52.609 | 19.229 | <2e-16  | ***    |
| te(t.e.moselle57,tuET57) | 5.005  | 6.308  | 1.487  | 0.175   |        |
| s(Q.Mo57)                | 3.000  | 3.000  | 4.059  | 0.007   | **     |

**R-sq. (adj)** = 0.862    **Deviance explained** = 90.1%

**GCV** = 1.657    **Scale est.** = 1.6175    **n** = 1147

**Signif. Codes :** \*\*\* p < 0.001  
 \*\* p < 0.01  
 \* p < 0.05  
 . p < 0.1  
 P < 1

## Qualité de l'eau distribuée à Nancy et incidence des gastro-entérites aiguës

2002-2007

L'étude turbidité et gastro-entérites vise à établir et caractériser le lien entre le niveau de turbidité d'une eau distribuée et le nombre de cas de gastro-entérites aiguës médicalisées (GEAm) observés sur la zone desservie. Ce volet de l'étude concerne 19 communes de la communauté urbaine du Grand Nancy et plus de 240 000 personnes. Les usines Saint-Charles (aujourd'hui abandonnée) et Edouard Imbeaux sont alimentées par les eaux de la Moselle pompées sur la commune de Messein. L'eau brute est traitée par des étapes classiques de clarification, décantation, filtration et désinfection.

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

Les résultats ne montrent pas de relation convaincante entre les niveaux de turbidité de l'eau produite et le risque de GEAm. Cependant, les risques apparaissent plus marqués aux fortes températures de l'eau. L'effet de la température doit être pris en compte pour mieux appréhender le rôle de la turbidité de l'eau distribuée sur le risque de GEAm. Les résultats de ces travaux confirment que les périodes d'étiage sont celles où le risque de GEAm est le plus fort pour les usines de production d'eau utilisant une ressource superficielle.

**Mots clés :** eau, turbidité, gastro-entérites, Assurance maladie, séries temporelles, Nancy, CUGN

## Quality of water distributed in Nancy (France) and incidence of acute gastroenteritis

2002-2007

*The turbidity and gastroenteritis study aims to establish and characterize the link between produced water turbidity and the incidence of acute gastroenteritis (AGE) in many French areas. This report concern 19 towns located in the metropolitan area of Nancy, including more than 240,000 peoples. The two water supply plants Saint-Charles (now out of order) and Edouard Imbeaux pumped their water from the Moselle river. Both treatment chains include classical operations of clarification, settling, filtration and disinfection.*

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

*The results do not show a relation between turbidity degradation and risk of AGE. Water temperature appears as a determinant factor to better characterize the role of water in the incidence of AGE. Results show that low-flow periods were the most at risk of AGE for water treatment plants which use water from a river.*

**Citation suggérée :**

Rambaud L, Zeghnoun A, Corso M, Beaudeau P. Qualité de l'eau distribuée à Nancy et incidence des gastro-entérites aiguës (GEA), 2002-2007. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire ; 2016. 42 p. Disponible à partir de l'URL : <http://www.invs.sante.fr>

**INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE**

12 rue du Val d'Osne

94415 Saint-Maurice Cedex France

Tél. : 33 (0)1 41 79 67 00

Fax : 33 (0)1 41 79 67 67

[www.invs.sante.fr](http://www.invs.sante.fr)

ISSN : 1956-9719

ISBN : 979-10-289-0195-0

ISBN-NET : 979-10-289-0196-7

Tirage : 30 exemplaires

Impression : France Repro, Créteil

Réalisé par Service communication - InVS

Dépôt légal : mars 2016