

# Modélisation rétrospective de la qualité microbiologique de la Seine en région parisienne.

Pierre Servais<sup>1</sup> et Gilles Billen<sup>2</sup>

*1 Ecologie des Systèmes Aquatiques,  
Université Libre de Bruxelles,  
Campus Plaine, CP 221,  
1050 Bruxelles, Belgique  
e-mail : [pservais@ulb.ac.be](mailto:pservais@ulb.ac.be)*

*2 UMR Sisyphe, Université Pierre & Marie Curie, Paris*

1. Introduction .....	1
2. Le modèle CF-SENEQUE.....	2
3. Modélisation rétrospective de la qualité microbiologique.....	3
4. Conclusion.....	7
5. Références .....	7

## 1. Introduction

Dans le bassin de la Seine, la qualité microbiologique des eaux est un enjeu considérable tant pour la production d'eau potable que pour la reconquête de la baignabilité, objectif affiché par nombre de communautés locales à l'amont du bassin. Pour cette raison, le programme PIREN mène depuis plusieurs années des actions visant à évaluer les sources de contamination microbienne, à étudier la dynamique des micro-organismes d'origine fécale dans les rivières du bassin avec l'objectif de développer un modèle prédictif validé de la contamination fécale à l'échelle de l'ensemble du bassin.

Les travaux expérimentaux menés sur les bactéries fécales dans le bassin de la Seine ont permis d'intégrer un compartiment « Coliformes fécaux » (CF) à l'applicatif SENEQUE pour former le modèle CF-SENEQUE. Ce modèle permet la prédiction des fluctuations spatiales et temporelles de l'abondance des CF dans toutes les rivières du bassin (Servais et al., 2003, 2005). Des premières validations de ce modèle par comparaison des calculs du modèle CF-SENEQUE avec des données de terrain collectées dans le cadre du PIREN avaient été présentées dans les rapports précédents pour la Seine, la Marne, la Vesle (Servais et al., 2003, 2005, Garcia-Armisen et al., 2004). En 2005, ce travail de validation a été poursuivi notamment en utilisant les données de suivis de qualité microbiologique effectués par le SIAAP dans l'agglomération parisienne (Servais et al., 2006). L'ensemble de ces travaux ont permis de montrer que le modèle CF-SENEQUE était capable de décrire les fluctuations de la qualité microbiologique exprimée en teneur en coliformes fécaux dans les rivières du bassin. Une fois validé, ce modèle peut être utilisé comme un outil d'aide à la décision en matière de gestion des

eaux de surface. Servais et al. (2006) ont présenté l'utilisation de ce modèle pour prédire la qualité microbiologique attendue en Seine suite à divers types de modifications de l'assainissement dans les unités de traitement gérées par le SIAAP.

En 2006, nous avons poursuivi le travail de modélisation en utilisant le modèle CF-SENEQUE pour simuler la qualité microbiologique des eaux de la Seine dans le passé. Ce rapport rappelle dans un premier temps le fonctionnement du modèle CF-SENEQUE. Il présente ensuite la manière dont a été abordée la constitution des bases de données nécessaire à la modélisation rétrospective. Nous présentons ensuite et discutons les résultats de modélisation de la qualité des eaux en Seine à l'entrée de l'agglomération parisienne (période 1920-2000) et dans la région parisienne (période 1870-2000).

## 2. Le modèle CF-SENEQUE

Le travail de modélisation de la qualité microbiologique (exprimée en terme de teneur en coliformes fécaux) nécessite tout d'abord de décrire correctement les apports de bactéries fécales vers les rivières. Deux types d'apports ont été quantifiés : les apports par les rejets de station d'épuration et les apports par ruissellement et lessivage des sols en zones rurales.

La plupart des rejets domestiques urbains sont aujourd'hui traités en stations d'épuration (STEPS). L'objectif de ce traitement est en priorité d'éliminer les matières en suspension et la matière organique des effluents et, pour les plus performantes d'entre les STEPs, la pollution azotée et éventuellement phosphorée. Bien que les eaux usées transportent aussi de nombreux germes fécaux (parmi lesquels certains sont pathogènes), très peu de STEPs sont à l'heure actuelle équipées de traitements spécifiquement conçus pour éliminer ces micro-organismes. Les études réalisées dans le cadre du programme PIREN Seine ont montré que les stations d'épuration classiques abattaient en général la pollution d'origine fécale de un à trois ordres de grandeur (George et al., 2002, Servais et al., 2007). L'efficacité de l'abattement dépend à la fois du bon fonctionnement de la STEP et du type de traitement. Ainsi le temps de séjour de l'eau dans les systèmes à boues activées influence l'efficacité de traitement tout comme la présence ou pas de biofiltres (George et al., 2002, Servais et al., 2007). A partir des données collectées à l'entrée et à la sortie des STEPs échantillonnées, la charge spécifique (quantité de CF rejetée par habitant et par jour) a pu être calculée pour divers types de traitement d'épuration (Servais et al., 2007). Pour la modélisation, les apports par les STEPs sont calculés en multipliant la capacité de chaque STEP par la charge spécifique dépendant du type de traitement utilisé.

En plus des rejets localisés des STEPs, le milieu naturel reçoit également des micro-organismes fécaux par des sources diffuses de contamination (ruissellement et lessivage des sols). Des données ont été acquises sur l'importance de ces types d'apport dans le cadre du programme PIREN Seine (George et al., 2004; Garcia-Armisen et Servais, 2006). Pour évaluer les apports diffus de coliformes fécaux, des prélèvements ont été effectués dans des petits ruisseaux en amont de tout rejet domestique, de manière à s'affranchir des apports d'origine humaine. Des ruisseaux s'écoulant en zones forestières, en zones cultivées et en zones de pâtures ont été échantillonnés. Cette stratégie d'échantillonnage a été utilisée dans le bassin amont de l'Oise, en Normandie (sous-bassins de l'Andelle, la Risle et l'Eure) et dans le sous bassin de la Blaise. La synthèse de ces résultats montre qu'en zones forestières et en zones cultivées, les valeurs d'abondance en coliformes fécaux résultant du ruissellement et du lessivage des sols sont de l'ordre de 100 CF/100 ml quelque soit la zone du bassin concernée. En zones de pâtures, les abondances moyennes sont toujours significativement plus élevées (de l'ordre de 1000 CF/ 100 ml)(Servais et al., 2006, 2007). Pour la modélisation, les apports diffus sont calculés sur base de ces résultats expérimentaux en tenant compte dans chaque petit bassin versant de l'usage du sol.

Les connaissances acquises sur les sources et le devenir des coliformes fécaux (CF) en rivière ont été intégrées dans un des modèles biogéochimiques et écologiques existant sur le bassin hydrographique de la Seine. Plus précisément, un compartiment décrivant la dynamique des CF a été intégré à l'applicatif SENEQUE issu du modèle SENEQUE (Billen et al. 1994 ; Ruelland et Billen, 2004) et

actuellement opérationnel sur l'ensemble du bassin de la Seine. L'ajout d'un compartiment « coliformes fécaux » aux modèles du PIREN avait pour objectif de pouvoir prédire par des modèles les abondances en bactéries fécales à diverses échelles spatiales et temporelles.

Le pouvoir auto-épurateur des eaux de surface vis-à-vis des bactéries d'origine entérique est un fait largement reconnu depuis des décennies. Ainsi, on considère généralement qu'une fois rejetées en rivière, les bactéries d'origine fécale disparaissent rapidement car elles ne sont pas adaptées à cet environnement qui leur est étranger. Cette disparition résulte de l'action combinée de divers paramètres physico-chimiques et biologiques qui interagissent entre eux. Dans le cadre de nos travaux, nous avons étudié et quantifié la vitesse de mortalité des *Escherichia coli* dans les rivières du bassin de la Seine grâce à une technique originale basée sur le marquage radioactif de bactéries fécales et le suivi de leur disparition dans des eaux naturelles (George et al., 2001; Menon et al., 2003, Servais et al., 2005). Il a ainsi été montré que :

- Le mortalité répondait à une cinétique d'ordre 1
- Le taux de mortalité ne dépendait pas de l'ordre des rivières (Servais et al., 2005) mais qu'il dépendait de la température.
- Le broutage par les protozoaires était le processus principal responsable de la mortalité bactérienne et que la lyse spontanée ou induite par des virus contribuait également à l'élimination des bactéries fécales des rivières. Diverses études avaient déjà montré l'importance prépondérante du broutage par les protozoaires (flagellés et ciliés) dans la mortalité des bactéries autochtones, mais aussi dans celle des bactéries d'origine fécale dans les milieux aquatiques naturels (Servais et al., 1989, 1992 ; Menon et al., 2003).
- Dans les grandes rivières, la vitesse de disparition hors sédimentation (mortalité + perte de cultivabilité) était 1.5 fois supérieure à la vitesse de mortalité mesuré par la méthode basée sur la marquage radioactif des bactéries fécales (Servais et al., 2006, 2007) .

Sur base des résultats expérimentaux, une nouvelle variable d'état, l'abondance en coliformes fécaux (CF) cultivables, a été ajoutée dans l'applicatif SENEQUE; cette variable est intitulée FEC. Du point de vue des processus, le modèle décrit le devenir des CF par l'équation suivante :

$$dCF/dt = -k_d * CF - (V_{dec}/Prof) * CF$$

avec  $k_d$ : constante du premier ordre décrivant la mortalité et la perte de cultivabilité

$V_{dec}$  : vitesse de sédimentation

Prof : profondeur de la rivière

Le premier des deux termes de l'équation décrit le processus de mortalité. Puisque nous cherchons à simuler la dynamique des CF cultivables, ce terme inclut la perte de cultivabilité des CF suite au stress engendré par le milieu aquatique. La valeur de la constante du premier ordre  $k_d$  est dépendante de la température.

Le second terme décrit la sédimentation des CF. Une vitesse de sédimentation uniforme (qui s'applique à l'ensemble du compartiment) est considérée.

### 3. Modélisation rétrospective de la qualité microbiologique

Une fois validé, un modèle tel que le modèle CF-SENEQUE peut être utilisé comme outil de prédiction pour tester l'impact de modifications de l'assainissement sur la qualité microbiologique des eaux de la Seine. Servais et al. (2006) ont présenté des scénarios de prédiction de la qualité microbiologique attendue en Seine suite à divers types de modifications de l'assainissement dans les unités de traitement gérées par le SIAAP.

Dans le cadre du présent travail, une modélisation rétrospective de la qualité microbiologique des eaux de la Seine a été entreprise. Ceci nécessite de pouvoir quantifier de manière rétrospective les sources de contamination des eaux de rivières par les bactéries fécales. Comme dans le bassin de la Seine, ce sont très nettement les sources ponctuelles (apports via les eaux usées) qui dominent aujourd'hui les apports de contaminants microbiens, on peut supposer que ceci était également vrai dans le passé, quand les eaux usées urbaines étaient traitées en moindre proportion (voire pas traitée du tout) et que les traitements d'épuration, quand ils existaient, étaient moins efficaces que maintenant. Dans ces conditions, il apparaissait essentiel pour le travail de modélisation rétrospective de reconstituer le plus correctement possible les apports ponctuels en bactéries fécales dans le passé. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur le travail de reconstitution historique des apports de matières organiques par les eaux usées effectué par Billen et al. (2007). Cette reconstitution des apports de matières organiques a été réalisée à la fois sur base d'une compilation des données de population et d'une reconstitution des capacités et du type de traitement d'épuration. Les figures 1 et 2 présentent l'évaluation de la quantité de population et de la capacité de traitement d'épuration, respectivement pour la partie amont du bassin de la Seine (bassin limité à l'entrée de l'agglomération parisienne) et pour l'agglomération parisienne. Afin de calculer les apports en coliformes fécaux par les eaux usées, nous avons considéré en première approximation un rapport constant entre les rejets de matières organiques biodégradables (DBO – demande biologique en oxygène) issus de la reconstitution historique de Billen et al. (2007) et les rejets en coliformes fécaux. Ce rapport constant de  $1.2 \times 10^9$  CF/g DBO a été établi sur base de mesures parallèles de DBO et de teneurs en coliformes fécaux effectuées sur des eaux usées brutes et traitées de divers STEPs du bassin dans le cadre du PIREN Seine. L'utilisation d'un tel impliquerait que, lors des traitements d'épuration, les coliformes fécaux soient abattus avec la même efficacité que la DBO. Si ceci semble vraisemblable pour les traitements d'épuration simples (primaire et boues activées), on sait que les traitements tertiaires et, évidemment, les traitements de désinfection sont beaucoup plus efficaces sur les bactéries fécales que sur la DBO. Néanmoins, cette approximation ne devrait pas être trop gênante pour la reconstitution historique, l'introduction du traitement tertiaire n'étant intervenue qu'assez récemment.

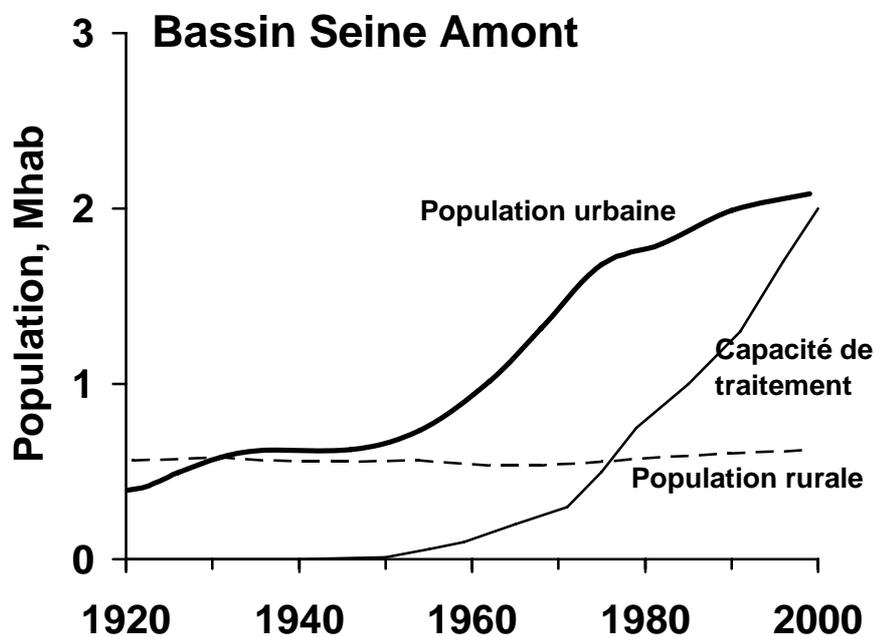


Figure 1: Reconstitution historique pour la période 1920-2000 des populations urbaines et rurales ainsi que la capacité de traitement des eaux usées dans le bassin amont de la Seine (bassin limité à l'entrée de l'agglomération parisienne) (Billen et al., 2007).

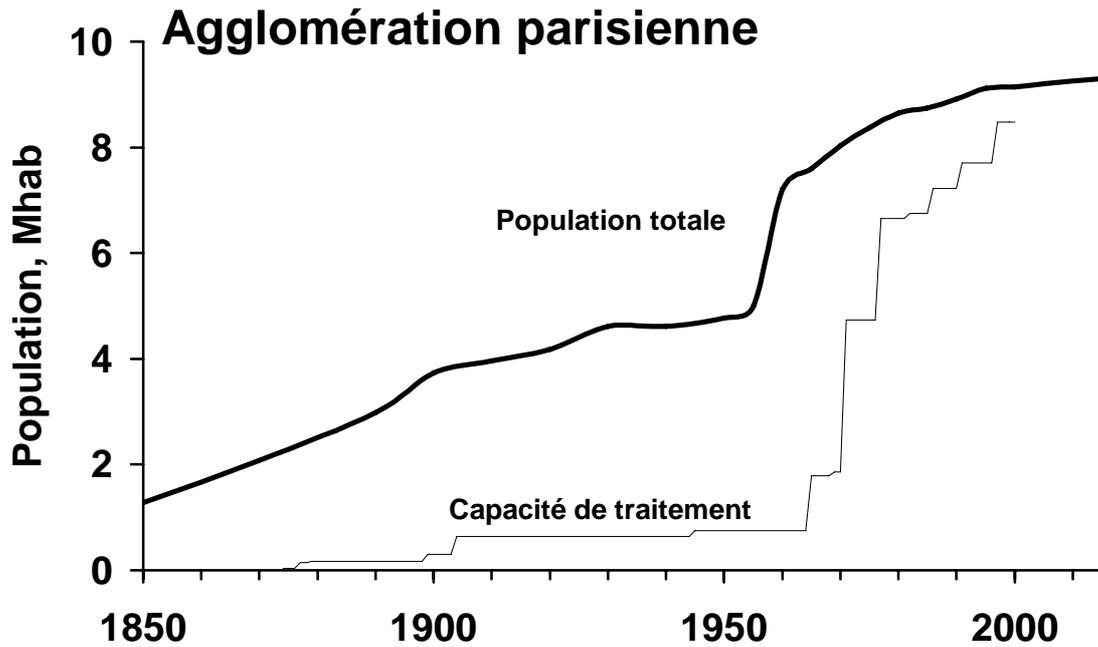


Figure 2: Reconstitution historique pour la période 1850-2000 de la population ainsi que la capacité de traitement des eaux usées dans l'agglomération parisienne (Billen et al., 2007).

La figure 3 présente la reconstitution historique, effectuée avec le modèle CF-SENEQUE, pour la période 1920-2000 de la teneur en coliformes fécaux à l'entrée de l'agglomération parisienne. Cette figure reprend également des données de deux suivis de la qualité de l'eau à Choisy-le-Roi. Le premier concerne les années 1935-1965 et provient des travaux de Mangerel (1969). Ces données sont en fait exprimées en concentration d'*Escherichia coli* et ont été converties en teneur en CF en tenant du rapport *E. coli*/CF de 0.77 déterminé sur des échantillons de rivières du bassin dans le cadre du programme PIREN Seine (Garcia-Armisen et al., 2007). Le second concerne les années 1980-2000 et provient du suivi de la qualité de l'eau brute à la prise d'eau de l'usine de production d'eau potable de Choisy-le-Roi (données SEDF-CGE).

La figure 3 montre d'abord que, pour les périodes où des données de terrain existent, les calculs de la teneur en CF effectués par le modèle sont en bon accord avec les valeurs expérimentales. On voit un accroissement assez lent de la pollution fécale en amont de Paris entre 1920 et 1960, qui correspond à une augmentation lente de la densité de population sur le bassin amont (Figure 1). A partir de 1960, cet accroissement s'accélère fortement en raison de l'augmentation rapide à ce moment de la population du bassin amont (Figure 1). Le maximum de contamination est atteint en 1985. Après cette date, le niveau de pollution décroît jusqu'à aujourd'hui en raison de l'augmentation de la capacité de traitement (Figure 1) et aussi grâce à l'amélioration des performances des traitements d'épuration appliqués.

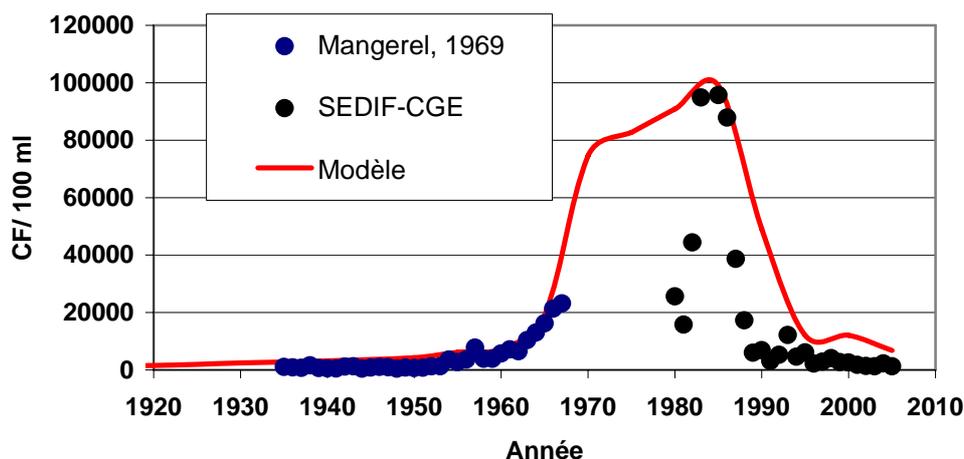


Figure 3: Reconstitution historique pour la période 1920-2000 de la teneur en coliformes fécaux à l'entrée de l'agglomération parisienne (trait noir) par le modèle CF-SENEQUE et données expérimentales à la station de Choisy-le-Roi. Les données expérimentales sont des moyennes annuelles ; pour la période 1935-1965, elles proviennent de Mangerel (1969) et pour la période 1980-2000 du suivi réalisé à la prise de l'usine de production d'eau potable de Choisy-le-Roi par le SEDIF et la CGE.

La figure 4 présente la reconstitution historique, effectuée avec le modèle CF-SENEQUE, pour diverses années de la période 1870-2003 des profils longitudinaux de teneur en coliformes fécaux dans la région parisienne. En 1870, on observe un premier accroissement de la concentration en CF dans la traversée de la ville de Paris, lié au rejet direct d'eaux usées dans Paris. L'essentiel des rejets a néanmoins lieu en aval de Paris (zone de Clichy). A cette époque, une part très significative des eaux usées de Paris est déjà collectée par le réseau d'assainissement conçu par Haussmann et Belgrand et évacuée vers l'aval de Paris où les eaux sont soit épandues (champ d'épandage à Gennevilliers, d'abord, à Achères ensuite) ou rejetées en Seine. Notons que c'est à cette époque que les peintures des impressionnistes nous montrent des parisiens se livrant à des activités récréatives (canotages et même baignade) en Seine dans la zone Chatou-Bougival, soit une vingtaine de kilomètres en aval du déversement des eaux usées à Clichy. Nos calculs de modélisation donnent dans cette zone une teneur en coliformes fécaux de l'ordre de 800 000 CF/100 ml, soit 400 fois la valeur de la norme impérative de qualité des eaux de baignade actuelle. En 1930, l'augmentation de la pollution fécale dans Paris est moins forte qu'en 1870, en raison de la diminution des rejets dans Paris intra-muros; le maximum de pollution est toujours observé à l'aval du rejet de Clichy. C'est en 1960 que l'on observe la situation la plus dégradée à l'aval de Clichy. Ceci s'explique à l'analyse de la Figure 2 qui montre que c'est vers les années 1960 que l'écart entre la population de l'agglomération parisienne et la capacité de traitement des eaux usées en région parisienne est le plus élevé, ce qui signifie que c'est aussi à cette époque que la quantité d'eau usée non traitée très riche en bactéries fécales est la plus importante.

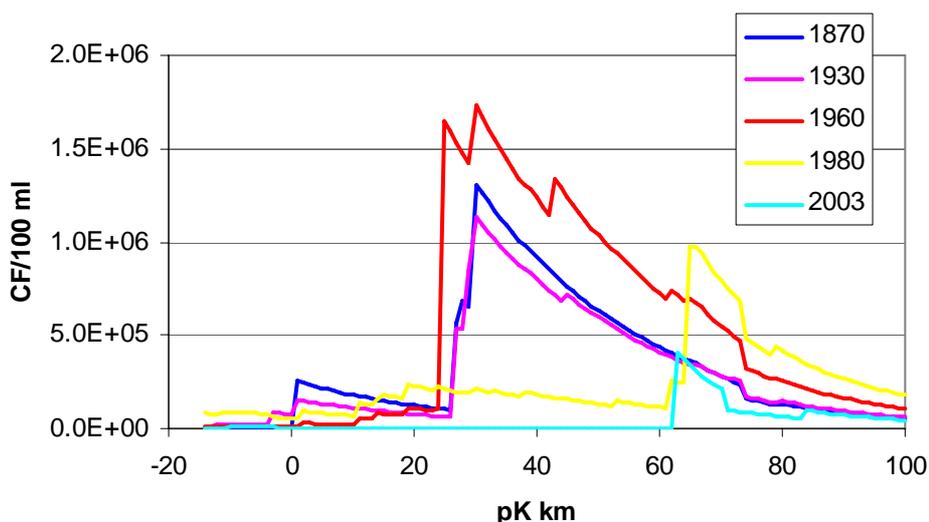


Figure 4: Reconstitution historique pour diverses années de la période 1870-2003 de la teneur en coliformes fécaux dans l'agglomération parisienne par le modèle CF-SENEQUE. L'axe des X est une échelle kilométrique avec le zéro au Pont Marie (Paris)(valeurs croissantes vers l'aval).

A partir de 1980, le maximum de pollution fécale se trouve à l'aval des rejets de la station d'épuration d'Achères. En 2003, le pic de contamination observé à l'aval d'Achères est significativement plus faible qu'en 1980. Ceci est dû à l'augmentation de la capacité de traitement (traitement de l'ensemble des rejets par temps sec et d'une bonne partie par temps de pluie) et aussi à l'amélioration des performances du traitement sur certaines unités.

#### 4. Conclusion

Grâce au modèle CF\_SENEQUE décrit ci-dessus, il est aujourd'hui possible de prédire les fluctuations spatiales et temporelles de la qualité microbiologique des eaux des rivières du bassin de la Seine. Nous avons déjà illustré les possibilités d'utilisation de ce modèle à des fins prospectives (Servais et al., 2006, 2007). Les deux exemples présentés dans ce rapport démontrent les possibilités et l'intérêt de l'utilisation de ce modèle pour effectuer des simulations rétrospectives de la qualité micro biologique de l'eau.

#### 5. Références

- Billen G., Garnier J., Hanset P. 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia* 289: 119-137.
- Billen G., Garnier J., Némery J., Sebillo M., Sferratore A., Barles S., Benoit P., Benoît, M. 2007. A long-term view of nutrients transfers through the Seine river continuum. *Science of the Total Environment*. In press.
- Garcia-Armisen, T., Servais, P. 2007. Respective contributions of point and non point sources of *E. coli* and Enterococci in a large urbanised watershed (the Seine river, France). *Journal of Environmental Management*. 82(4): 512-518 .

- Garcia-Armisen, T., Prats, J., Servais, P. 2007. Comparison of culturable fecal coliforms and *Escherichia coli* enumeration in freshwaters. *Canadian Journal of Microbiology. Soumis*.
- Garcia-Armisen, T., Mercier, P., Servais, P. 2004. Les bactéries indicatrices de contamination fécale dans les eaux du bassin de la Seine. *Rapport PIREN Seine 2003*
- George, I., Petit, M., Theate, C., Servais, P. 2001. Distribution of coliforms in the Seine river and estuary (France) studied by rapid enzymatic methods and plate count. *Estuaries* 24(6b): 994-1002.
- George, I., Crop, P., Servais, P. 2002. Fecal coliforms removal by wastewater treatment plants studied by plate counts and enzymatic methods. *Water Research*, 36: 2607-2617
- George, I., Anzil, A., Servais, P. 2004. Quantification of fecal coliform inputs to aquatic systems through soil leaching. *Wat. Res.* 38. 611-618.
- Mangerel, P. 1969. La pollution urbaine des eaux de la région parisienne. *Bull. section de Géographie*. Tome LXXX : 133-156
- Menon, P., Billen G., Servais P. 2003. Mortality rates of autochthonous and fecal bacteria in natural aquatic ecosystems. *Water Research*. 37 : 4151-4158
- Ruelland, D. et Billen, G. (2004) Applicatif SENEQUE 3 : notice d'utilisation (2001-2004). *Rapport PIREN-Seine 2003, développements méthodologiques et scénarios tendanciels*. CNRS, Paris. 30 p.
- Servais, P., Billen, G., Vives-Rego, J. 1985. Rate of bacterial mortality in aquatic environments. *Appl. Environ. Microbiol.*, 49 : 1448-1454.
- Servais, P., Billen, G., Martinez, J., Vives-Rego, J., 1989. Estimating bacterial mortality by the disappearance of <sup>3</sup>H-labelled intracellular DNA. Technical validation and field measurements. *FEMS Microbiol. Ecology*, 62 : 119-126.
- Servais, P., Vives-Rego, J., G. Billen, 1992. Survival and mortality of bacteria in natural environments. In : *Release of genetically engineered and other microorganisms*. J.C. Fry & M.J. Day, eds., Cambridge University Press, p. 100-119.
- Servais, P., Garcia Armisen, T., Mercier, P., Lizin, P., Anzil, A. 2003. Etude et modélisation de la qualité microbiologique des eaux du bassin de la Seine. *Rapport PIREN Seine 2002*.
- Servais, P., Garcia-Armisen, T., Espinel, N., Fouqueray, M., Mouchel, J.M. 2005. La contamination d'origine fécale des eaux du bassin de la Seine. *Rapport PIREN Seine 2004*
- Servais, P., Garcia-Armisen T., Billen, G., Rousselot, O. 2006. Modélisation du niveau de contamination fécale de la Seine en région parisienne : situation présente et future. *Rapport PIREN Seine 2005*
- Servais P., Garcia-Armisen T., George, I., Billen, G. 2007. Fecal bacteria in the rivers of the Seine drainage network (France): sources, fate and modelling. *Science of the Total Environment*. In press.