



CARACTERISATION des REJETS URBAINS de TEMPS de PLUIE et de leurs IMPACTS sur l'OXYGENATION de la SEINE

Martin Seidl

Thèse soutenue le 29 septembre 1997
devant Jury composé de:

Président et Directeur de thèse : Pierre SERVAIS

Rapporteurs : Jean-Claude BLOCK
Dominique FONTVIEILLE

Examineurs : Thorkild HVITVED-JACOBSEN
Michel GOUSAILLES
Jean-Michel MOUCHEL

Résumé

Les rejets urbains par temps de pluie constituent un problème majeur pour les gestionnaires de l'eau en région parisienne. Une meilleure caractérisation des matières organiques rejetées par temps de pluie permet de mieux évaluer la désoxygénation du milieu récepteur. la Seine

Un bassin versant expérimental a été choisi en proche banlieue Parisienne pour étudier les eaux usées par temps de pluie. Les résultats montrent que les flux sont une fonction du cycle journalier des eaux usées et de l'intensité des pluies. En journée par temps sec, les teneurs en polluants et les débits sont plus élevées que pendant la nuit. Les flux des polluants déversés pendant la journée sont ainsi supérieurs aux flux rejetés la nuit à pluie égale. Dans les réseaux de petite caille et de faibles pentes, un dépôt de temps sec peut être remis en suspension par des pluies intenses et augmenter temporairement la charge polluante. Les matières organiques du réseau en temps sec sont mieux et plus rapidement dégradables qu'en temps de pluie. La biodégradabilité des matières en suspension dans le réseau diminue avec l'intensité des pluies en raison d'un apport de carbone faiblement dégradable par les eaux de ruissellement et les dépôts en réseau. L'effet toxique des rejets urbains de temps de pluie sur le milieu récepteur a été étudié au laboratoire sur une population mixte du phytoplancton de la Seine. Nos études montrent que les rejets peuvent diminuer la production primaire de la Seine de l'ordre de 60% après une dilution au cinquième, cette inhibition est principalement due aux micropolluants organiques et partiellement aux métaux lourds, dont le zinc. Les effets varient fortement avec la composition des rejets, la toxicité des métaux en particulier dépendant de leur état de complexation. Le comportement de la matière organique et des bactéries hétérotrophes rejetées par temps de pluie dans le milieu récepteur a été étudié en Seine après d'importants rejets du principal déversoir de la région parisienne. Lorsque la dilution du rejet est inférieure à 10%, les effets sur le milieu sont peu sensibles. Les masses d'eau usée ont pu être suivies in situ à l'aide de la conductivité et des concentrations d'oxygène. Une relation entre la quantité de carbone organique dissous biodégradable rejetée et le déficit d' O_2 a pu être établie, La matière organique fixée aux matières en suspension sédimente très rapidement et ne participe pas directement à la désoxygénation. La désoxygénation in situ est principalement due aux bactéries allochtones, apportées par le rejet, de taille supérieure à $1 \mu m$. Leur croissance est plus élevée que celle des bactéries fluviales, mais leur vitesse de disparition l'est aussi. Les polluants toxiques du rejet sont susceptibles de diminuer la production du phytoplancton et d'aggraver ainsi les déficit de près d'un milligramme d'oxygène voire plus en période de forte production. Ces données permettent des simulations détaillées de l'évolution de l'oxygène dissous en Seine suite aux principaux rejets de l'agglomération parisienne.

SOMMAIRE

PRÉFACE

RÉSUMÉ

ABSTRACT

COLLABORATIONS

LISTE D'ABRÉVIATION

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. CARACTERISATION de la MATIERE ORGANIQUE et de la BIOMASSE REJETEE par TEMPS de PLUIE par le RESEAU UNITAIRE

1.1. RESEAU

Caractérisation des matières organiques dans le réseau de Boulogne par temps de pluie

Biodegradable organic carbon and heterotrophic bacteria in combined sewer during rain events.

Seidl M., G. Belhomme, P. Servais, J.M. Mouche1 & G. Demortier

proceedings of 7th IUCSD Hunnover Germany, September 1996

p.15

Composition et flux du carbone organique et de la biomasse bactérienne par temps de pluie, sur un bassin versant expérimental

Organic carbon biodegradability and heterotrophic bacteria along a combined sewer catchment during rain events

Seidl M., P. Servais, M. Martaud, C. Gandouin & J.M. Mouche1

WATER SCIENCE TECHNOLOGY, janvier 1998

p.23

Spéciation des matières organiques du réseau unitaire par temps de pluie et par temps sec

Comparison of parameters characterising organic matter in a combined sewer during rain events and dry weather

Pierre Servais, Martin Seidl & Jean-Marie Mouche1

soumis WATER ENVIRONMENT RESEARCH juillet 99 J

p.33

Mesures de la respiration dans les eaux usées

Seidl M.,

"MESURES ET ENVIRONNEMENT" Actes de 7^{èmes} journées du DEA STE, Mai 1996

p.51

1.2. MILIEU RECEPTEUR , LA SEINE

Transport et dégradation de la matière organique en Seine après un rejet urbain par temps de pluie.

Organic matter transport and degradation in the river Seine (France) after a Combined Sewer Overflow.

Seidl M., P. Servais & J.M. Mouchel

accepté *WATER RESEARCH*, février 1997

p.61

2. EFFETS TOXIQUES de REJETS URBAINS sur le PHYTOPLANCTON

Evaluation de l'impact des rejets urbains par temps de pluie sur la production primaire du phytoplancton: contribution des métaux lourds

Toxicity of combined sewer overflows on river phytoplankton: the role of heavy metals

Seidl M., V.Huang & J.M.Mouchel

accepté *ENVIRONMENTAL POLLUTION* décembre 1997

p.83

L'effet de différents complexants organiques sur la toxicité du cadmium et du zinc chez l'algue verte *Selenastrum capricornutum*: Exception sur le modèle de l'ion libre

Influence of a low molecular weight metabolite (citrate) on the toxicity of cadmium and zinc to the unicellular green alga *Selenastrum capricornutum*: An exception to the free-ion model

Olivier Errecalde, Martin Seidl and Peter G. C. Campbell

WATER RESEARCH février 1998

p.103

3. MODELISATION des IMPACT de REJETS URBAINS par TEMPS de PLUIE en SEINE

Simulation des déficits d'oxygène dissous dans la Seine en aval de déversoirs d'orage à l'aide du modèle ProSe

Even S., J.M. Mouchel, M.Seidl, P. Servais & M.Poulin

accepté *ANNALES DE LIMNOLOGIE* décembre 1997

p.127

4. DISCUSSION GENERALE

p. 143

5. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

p.163

BIBLIOGRAPHIE (récapitulation)

p.169

“Dans le monde où nous vivons, les phénomènes économiques étant défini par la production et la consommation, où la seule préoccupation est d’adapter l’une à l’autre. et c’est déjà malaisé, l’eau apparaît comme un *produit* bizarre dont les caractéristiques rendent difficile la pleine saisie du problème. L’eau d’abord vient toute seule, du ciel. comme elle veut et quand elle veut. Trop abondante parfois, trop rare en certains lieux et à certaines époques, jamais docile. Sans elle, la vie n’existerait pas”

(CCI 1980)

Par son abondance et ses qualités physico chimiques l’eau joue un rôle de vecteur dans la presque totalité des usages qu’en fait l’homme. L’eau absorbe facilement, sous forme dissoute ou en suspension, toutes sortes de substance en modifiant sa qualité. La nature a construit le monde et l’homme, dans ses usages et ses habitudes, disposant de processus de régénération et, tant que la population n’est pas trop élevée, la nature arrive grâce à l’auto-épuration des cours d’eau à maintenir un écosystème diversifié et abondant. Mais l’urbanisation, l’industrialisation et l’usage de produits de synthèse ont totalement bouleversé cet équilibre

Paris est né de l’eau. Ses premiers habitants, les Parisii, étaient un peuple qui fondaient leur commerce sur l’existence de la Seine, Au cours des siècles c’est encore la Seine et ses affluents, qui guideront l’extension de la ville. Les premier aménagements d’assainissement de Paris, datent de l’Empire romain, quand les ingénieurs n’hésitaient pas à construire des aqueducs, parcourant des dizaines de kilomètres. Depuis les travaux de Belgrand et de Haussman, les ramifications des réseaux d’eau potable et d’eaux usées n’ont pas cessé de se modifier et de se multiplier pour mieux servir la ville. La Seine est un fleuve de petite taille au regard de l’énorme concentration de population et d’activités qui s’est développée sur l’ensemble de son bassin; le fonctionnement de ce fleuve est aujourd’hui fortement contrôlé par les aménagements construits, barrages réservoirs, prises d’eau, rejets et stations de traitement des eaux usées. Les conflits d’usage sont inévitables.

La gestion des équipements existant, la programmation des nouveaux ouvrages et en particulier la modernisation de l’assainissement urbain en temps sec et en temps de pluie demandent un niveau de connaissance et de finesse de prévision qui n’est pas actuellement encore atteint. Pour répondre à ce besoin, la connaissance de l’écosystème fluvial de la Seine devrait être renforcé à partir des observations approfondies sur le terrain et d’une analyse expérimentale détaillée de chacun des mécanismes intervenant. Un groupe de travail constitué pour donner suite à ce besoin, soutenu financièrement et matériellement par les gestionnaires a vu le jour: le PIREN Seine. Les principaux axes de ce projet interdisciplinaire en recherche en environnement ont été i) l’axe fluvial, ii) le corridor fluvial, iii) les barrages réservoirs , iv) les bassins versants ruraux et v) les bassins versants urbains. Le programme se poursuit aujourd’hui, cherchant toujours à compléter et intégrer les connaissance acquises sur le bassin de la Seine.

Les rejets urbains en temps de pluie (RUTP) sont d'actualité depuis une vingtaine d'années et ont fait l'objet de nombreuses recherches en France et à l'étranger. Les équipes participant au PIREN Seine constituent depuis plusieurs années un cadre de recherche sur les rejets urbains. Les thèses de Bachoc (1992) et Chebbo (1992) ont permis de spécifier l'ordre de grandeur et la variabilité des principaux paramètres des rejets ou des eaux de pluies susceptibles d'être déversées, soit les volumes et débits déversés, MES, NH₄, DBO, DCO et les micro polluants métalliques. La création d'une base de données sur la qualité des rejets par temps de pluie par Saget (1994) a permis d'avoir un support pour le dimensionnement des ouvrages. Les recherches doctorales de Florez Rodriguez (1992) et Lebreton (1996) ont montré la variabilité de la spéciation des métaux particuliers en milieu urbain. Lebreton a étudié le potentiel de solubilisation des métaux particuliers, tandis qu'Estebe (1996) a étudié la dynamique des particules et des métaux rejetées en Seine. Les concentrations in situ après les RUTP pourront être ainsi suffisamment élevées pour nuire à la production primaire et aggraver les déficits d'oxygène dus aux déversements en temps de pluie. En milieu récepteur, les recherches de Barillier (1992) ont permis de caractériser la dégradation des matières organiques rejetées par temps sec dans le milieu fluvial Seine. L'application des nouveaux concepts de la dégradation bactérienne de la matière organique, formulés auparavant par Servais (1987) a donné une nouvelle impulsion à la modélisation. La thèse de Even (1995) a été ainsi entièrement consacrée à la modélisation de la qualité en Seine et notamment en région parisienne. Une étude des relations entre les rejets et les déficits observés en aval des principaux déversoirs Clichy et La Briche, est actuellement en cours de réalisation (Delbec *in prep.*). Cependant les connaissances acquises se montrent insuffisantes pour valider l'application de ces concepts aux déficits d'oxygène provoqués par les RUTP.

Lu place de la thèse présentée ici doit être vue comme une suite logique des travaux antérieurs vers une meilleure compréhension des impacts des RUTP en Seine. Le travail se concentre sur 3 compartiments intervenant dans le bilan d'oxygène: les bactéries - hétérotrophes - la matière organique rejetée - le phytoplancton. Les 2 premiers paramètres déterminent l'ampleur du déficit d'oxygène et le troisième le modifie. Les thèmes étudiés sont liés à la modification du bilan d'oxygène du milieu récepteur par le RUTP due i) aux caractéristiques des rejets tels que le fractionnement du carbone organique biodégradable et la biomasse bactérienne hétérotrophe, ii) à la biodégradation in situ iii) à l'inhibition de la production primaire.

Les rejets urbains en temps de pluie: l'état des connaissances

Les zones urbaines constituent incontestablement une perturbation majeure des écosystèmes fluviaux. Le corridor fluvial de la Seine, a été très fortement aménagé en milieu urbain. Les effluents en temps sec ou les rejets en temps de pluie, perturbent le milieu fluvial sur des dizaines voire des centaines de kilomètres à l'aval. Les rejets d'une agglomération ne se limitent malheureusement pas aux eaux résiduaires des stations d'épuration. Les effluents industriels ou domestiques non raccordés aux réseaux d'assainissement contribuent à la pollution diffuse, difficilement quantifiable, En temps de pluie, l'évacuation de l'eau lessivant

3. Applications pratiques

Le deux systèmes décrits sont actuellement disponibles sur le marché (tableau 1), mais pour des applications différentes. Le système classique, continu est appliqué dans des stations d'épuration des industries chimiques et agro-alimentaires. Les grandes complexes industriels possèdent souvent leur propre station de traitement. La boue activée reste cependant relativement sensible aux herbicides et aux métaux lourds. Le système de respirométrie sert ici de moniteur pour la protéger contre des pollutions accidentelles. Une intoxication de boues peut provoquer un arrêt complet de la station pendant plusieurs jours et peut nécessiter un achat d'inoculum. Dans l'industrie agro-alimentaire la respirométrie peut être appliquée pour la détection des fuites dans le circuit de production. Une augmentation de la respiration indique une présence de sources de carbone supplémentaire, provenant des denrées alimentaires.

Le système de mesure dans la phase gazeuse est utilisé en combinaison avec les mesures de CO₂, pour suivre la respiration des animaux ou des végétaux. Les expériences menées sur les animaux domestiques permettent une optimisation de leur nutrition. L'application pour les mesures de DBO des eaux usées est en cours de développement.

Tableau 1: Comparaison de systèmes commercialisés équivalents aux systèmes de mesures utilisés dans les travaux cités.

	Mesures EAU	Mesures AIR
Utilisation	monitoting des boues activées	mesures des métabolisme animal
Commercialisation	respiromètre RA 1000 Manotherm (Martec)	micro Oxy-Max, Columbus Instruments (Eurosep)
Sensibilité	0.2 mg-O ₂ /l.h	0.3 µg-O ₂ /h (!)
Fréquence de mesures	< 35 /h	0.2/h
Prix	200 kF	250 kF
NOTRE SYSTEME		
Fréquence de mesures	< 12 /h	< 1/h
Limite de détection	2 mg-O ₂ /l.h	0.15 mg-O ₂ /l.h
Prix (recherche & développement)	8.5 kF	75 kF

4. Conclusion

Les systèmes utilisés tant pour la recherche que pour la maîtrise de qualité ont leurs avantages et inconvénients. Les systèmes de recherche sont relativement peu coûteux (40% du prix de l'appareil commercial), mais nécessitent souvent un traitement de signaux spécifiques et une maintenance importante. Les systèmes commerciaux sont robustes du côté instrumentation, livrés parfois avec des logiciels adaptés, mais ne conviennent pas toujours aux besoins du terrain. Dans les deux cas la fréquence de mesures dépend surtout de la vitesse de réponse de la sonde et du

volume échantillonné. Le système de mesure dans la phase liquide est relativement simple et peut être reconstruit au laboratoire avec quasiment les mêmes performances que le produit commercial. Le système type Oxy-Max pour mesure dans l'air est plus complexe et demande beaucoup plus de développement avec un fort accent sur l'instrumentation. Cependant c'est le type d'instrument prometteur pour les mesures de la DBO, en continu.

Références bibliographie

- Garnier J., Servais P. et Billen G. (1992). Bacterioplankton in the Seine river (France) : impact of the parisian urban effluent. *Canadian Journal of Microbiology*, 38:56-64.
- Ford, T.E. éditeur (1993) *Aquatic Microbiology, An ecological Approach* Blackwell Publ. Oxford 520p.
- Metcalf & Eddy Inc. (1984) *Wastewater engineering, Treatment, Disposal & Reuse* TATA McGraw-Hill New Delhi 920p.
- Seidl, M., P.Servais, A. Anzil & J.M. Mouche1 (1996) *Dégradation des matières organiques dans le milieu naturel après les rejets urbains*. Agence de l'Eau Rhin-Meuse programme Inter-Agences 120p.

Bilans.

Nous avons au cours de ce travail caractérisé par des mesures globales la dégradabilité des matières organiques transportées en réseau par temps de pluie en comparaison au temps sec. Ces résultats ont permis de mettre en évidence la très faible dégradabilité et la forte teneurs en matières minérales des matières ruissellées sur les chaussées mais également la contribution des dépôts en réseau, également moins dégradables. La biodégradabilité des matières en suspension dans un petit réseau diminue significativement avec l'intensité des pluies en raison d'un apport de carbone faiblement dégradable par les eaux de ruissellement et les dépôts en réseau. La plupart des pluies interceptées ont donné lieu au phénomène de "first flush" dans les collecteurs de faible pente, suite à la resuspension des dépôts de temps sec. L'amplitude des fluctuations des paramètres de qualité diminue avec l'augmentation du temps de séjour dans le réseau. suite au décalage temporel entre les flux provenant des divers sous-bassins, Cette évolution a été perçue aussi bien dans le cycle journalier en temps sec, que dans la propagation du ruissellement par temps de pluie. La position de déversoir dans le réseau va ainsi jouer sur le flux polluant rejeté par temps de pluie.

La biomasse représentant quelques pour cents de la matière organique, ne montrait pas de fortes différences pas temps sec et par temps de pluie ni dans un petit, ni dans un grand bassin versant unitaire, mais des évolutions notables ont été observées d'amont en aval, et en fonction de la saison. Ceci démontre que la biomasse déversée, qui joue un rôle important dans les déficits en rivière, n'est pas un composant des eaux usées, mais se développe dans les réseaux. Ce fait laisse présager que des techniques de curage des **biofilms** en réseau pourraient limiter l'impact des rejets.

En Seine, nous avons pour confirmer que les idées mises en avant à la suite de l'étude du devenir des effluents de la station d'Achères restaient en grande partie valides en ce qui concerne les RUTP, à savoir l'apport massif de grosses bactéries à fort taux de croissance par les rejets et leur disparition plus rapide que celle des bactéries autochtones, essentiellement par sédimentation dans le cas de RUTP. La forte sédimentation nous pousse également à conclure que le COP ne joue qu'un rôle mineur dans les désoxygénations.

Les masses d'eau polluées issues par temps de pluie du principal déversoir de la région parisienne ont pu être suivies in situ à l'aide de la conductivité et de la teneur en oxygène. La conductivité et l'ammonium, contrairement au COD et à la biomasse, apparaissent comme conservatifs. L'impact principal des RUTP unitaires, le déficit d'oxygène n'est en fait pas lié à la quantité des MES rejetés mais à l'apport de COD, qui sera le substrat principal des bactéries hétérotrophes. La quantité de CODB rejetée correspond bien au déficit d'oxygène mesuré 20 km en aval du rejet. Cependant l'augmentation des concentrations de COD mesurées en ce point indique un apport de carbone supplémentaire, provenant en partie du COP rejeté, mais aussi probablement du phytoplancton. L'apport de carbone par le phytoplancton peut être dû à la diminution de l'ensoleillement, mais aussi aux effets phytotoxiques des rejets.

Enfin, nous avons abordé un phénomène fort peu étudié dans le domaine des RUTP, à savoir leur toxicité pour le phytoplancton. Les rejets urbains de temps de pluie apportent au milieu une quantité extrêmement importante de micro polluants, suffisante pour affaiblir l'activité photosynthétique et diminuer les concentrations d'oxygène dissous en dehors de tout effet dû

à l'activité hétérotrophe. La toxicité de rejets est prouvée, même après une dilution au cinquième. Environ un quart de l'effet serait dû aux métaux lourds, notamment au zinc, et trois quarts aux micro-polluants organiques. Nous concluons que, contrairement au cuivre et au plomb, les concentrations en zinc présentes dans les rejets et en Seine après les déversements de temps de pluie, sont capables de diminuer la production primaire. Nous considérons cependant que la complexité des interactions entre les différents effets toxiques demande qu'une étude complémentaire soit entreprise. L'effet toxique serait comparable en ampleur à la réaération naturelle en Seine. Le modèle courant pour la toxicité des métaux est celui de l'ion libre, nous avons participé à des travaux qui montraient sa non-validité en présence de certains complexants.

Tous ces résultats ont pu être rassemblés dans le modèle ProSe pour simuler très raisonnablement l'impact du RUTP de Clichy, y compris les effets toxiques. Le travail sur RUTP a constitué ainsi un rest important pour la validation plus générale des résultats obtenus précédemment à l'aval d'Achères. La modélisation par ProSe des rejets urbain par temps de pluie confirme que l'augmentation de la consommation hétérotrophe peut être équivalente à la diminution de photosynthèse due aux conditions météorologiques précédant le déversement. L'état physiologique du phytoplancton joue ainsi un rôle clef dans le bilan d'oxygène en situation d'étiage après les rejets urbains de temps de pluie en Seine. Les déversements sont susceptibles de diminuer la production primaire plus par leur action toxique que par l'augmentation de la turbidité. Un prétraitement de type décantation ne peut diminuer significativement le déficit in situ que par la rétention de la biomasse bactérienne et ne peut pas retenir les micro-polluants liées aux particules très fines, susceptibles de **relargage** des toxiques

Les résultats obtenus ont permis de mieux comprendre les processus de transformation des matières organiques apportées par les rejets urbains, et de quantifier leur relation à la désoxygénation. Plusieurs chemins ont été éclaircis, mais des nouveaux ont été découverts, proposant des suites.

Perspectives.

Plusieurs grandes lignes de perspectives s'ouvrent à l'issue de ce travail :

- d'une part des perspectives scientifiques pour répondre à certaines des questions qui sont restées en suspens ou se développées au cours de ce travail,
- d'autre part des perspectives en matière de gestion. En effet nos résultats pourraient suggérer qu'une bonne gestion de la biomasse en réseau permettrait d'agir sur l'impact des RUTP, ce point mérite d'être approfondi, de même que la caractérisation de l'impact des réseaux séparatifs devrait être abordé maintenant,
- enfin, nous pensons que ces travaux devraient être poursuivis dans un milieu différent de la Seine, les questions de sédimentation, et la part des bactéries autochtones en particulier pouvant y être fort différents.

Des études complémentaires seront nécessaires notamment pour élucider les flux de carbone entre les différents compartiments in situ : bactéries, phytoplancton et MES abiotiques :

- Comment caractériser les différents substrats des bactéries du modèle HSB ?
- Comment se passe l'éventuel transfert de matière organique de la phase particulaire à la phase dissoute ? S'agit-il d'un phénomène physique (défloculation) ou biologique (lyse partielle des macromolécules particulières) ?

En ce qui concerne les bactéries, l'importance des bactéries allochtones dans la consommation d'oxygène appelle des développements complémentaires:

- Si le processus de perte de ces bactéries est bien une sédimentation, que deviennent ces bactéries déposées ?
- La différence entre les bactéries de grande et de petite taille est elle morphologique ou fonctionnelle? Autrement dit quel est l'activité spécifique des petites bactéries du réseau ?
- Est ce qu'un traitement de RUTP éliminant ces bactéries est efficace ?

Finalement, en ce qui concerne le phytoplancton, nous pensons que l'action des facteurs défavorables au phytoplancton mérite une attention particulière.

- Comment réagit le phytoplancton en condition défavorable ? Le carbone organique dissous qui pourrait être produit à cette occasion, est-il spécifiquement lié à un processus de détoxification ou le manque de lumière peut-il l'expliquer ?

Remerciements.

Je voudrais ajouter que les travaux de terrain aussi bien que le travaux de laboratoire ont été rendu possible grâce aux soutien personnel aussi bien que financier du SIAAP, des Agences de l'Eau Seine-Normandie et Rhin-Meuse, du SNS, du GMMA de Université libre de Bruxelles, de l'Institut de Biogéochimie Marine à Montrouge et évidemment du "consortium" CERGRENE-LABAM.