



Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

2007-2008

## Projet de Fin d'Etudes

Département Ville Environnement Transport

Fabien ESCULIER

Ingénieur-élève

# **Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées**

Projet réalisé au sein de la Setec

Filiales Hydratec et Partenaires Développement

Tour Gamma D 58 quai de la Rapée

75 583 PARIS Cedex 12

du 11 septembre 2007 au 8 août 2008



Tuteur : François Fiévet

### **Composition du jury**

Président : Mme Élisabeth DUPONT-KERLAN

Directeur de projet : M. Michel GOUSAILLES

Conseiller d'études : M. Vincent PIRCHER

## Résumé

Notre société conçoit les déchets de façon linéaire et non cyclique. Afin de favoriser nos déchets à devenir une ressource, les collectes sélectives, l'éco-conception, l'implication et l'éducation de tous doivent être encouragées.

Les eaux usées constituent un déchet particulier de composition complexe. Le traitement des eaux résiduaires urbaines en stations d'épuration permet de rejeter au milieu naturel une eau de qualité acceptable mais au prix d'équipements coûteux, de consommation énergétique de plus en plus élevée, tout en produisant des boues dont la valorisation est délicate. L'exemple du cycle de l'azote en assainissement illustre l'aberration énergétique de l'assainissement industriel. Parmi les évolutions possibles de l'assainissement, la séparation à la source des eaux usées, déjà largement établie pour les déchets solides, semble prometteuse. La contrainte des réseaux d'égouts rend toutefois difficile les multiplications de flux, à moins de passer à des traitements locaux.

L'atteinte du bon état écologique des masses d'eau pour 2015 est un des grands objectifs environnementaux européens. Dans ce but, la France doit bâtir une politique de l'eau solide. Les rejets urbains de temps de pluie devront être maîtrisés car ils limitent aujourd'hui, en région parisienne, l'atteinte du bon état écologique. MAGES, Modèle d'Aide à la Gestion des Effluents du SIAAP<sup>1</sup>, est un des outils devant permettre de minimiser les déversements en temps de pluie. Si un module qualité y était adjoint, le SIAAP disposerait d'un outil très complet de gestion des déversements de temps de pluie et de leurs impacts. Une analyse du fonctionnement de l'écosystème d'une rivière et des interactions des différents paramètres de qualité est donc menée. L'étude des logiciels ProSe et MOKA-Eau complète cette analyse et fournit ainsi des pistes pour le développement d'un tel module.

---

<sup>1</sup> *Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne*

## Table des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>2</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>3</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>5</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>6</b>
<b>Contexte.....</b>	<b>8</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>1. Peut-on gérer nos déchets de façon cyclique ?.....</b>	<b>10</b>
1.1. Une société de consommation linéaire .....	10
1.2. Faire des déchets une ressource.....	12
1.3. L'éco-conception.....	14
1.4. Les limites de la gestion cyclique de nos déchets .....	16
<b>2. Application de la gestion cyclique aux eaux usées.....</b>	<b>19</b>
2.1. Composition des eaux usées.....	19
2.1.1. Les eaux usées domestiques .....	19
2.1.2. Les eaux industrielles .....	20
2.1.3. Les eaux pluviales .....	20
2.2. Gestion de la diversité des composants des eaux usées .....	21
2.2.1. La station d'épuration : une usine à assainir l'eau .....	22
2.2.2. Devenir des boues .....	24
2.3. L'exemple du cycle de l'azote dans l'assainissement .....	26
2.3.1. Cycle de l'azote dans la nature .....	26
2.3.2. L'azote dans les systèmes d'assainissement.....	28
2.3.3. Les problèmes du cycle industriel de l'azote.....	29
2.4. Quelques pistes d'amélioration de l'assainissement .....	31
2.4.1. Le tri sélectif : pourquoi pas pour les eaux usées ?.....	31
2.4.2. La séparation des graisses .....	31
2.4.3. La séparation des eaux-vannes .....	32

2.4.4.	<i>La séparation de l'urine</i> .....	33
2.4.5.	<i>Autres séparations</i> .....	36
<b>3.</b>	<b>Un déchet problématique : les rejets urbains de temps de pluie</b> .....	<b>37</b>
3.1.	Le Bon État écologique des masses d'eau.....	37
3.1.1.	<i>La directive cadre européenne</i> .....	37
3.1.2.	<i>Évaluation de la qualité de l'eau</i> .....	38
3.1.3.	<i>L'atteinte du Bon État écologique pour la Seine à Paris</i> .....	40
3.2.	Les rejets de l'assainissement dans la région parisienne.....	43
3.2.1.	<i>Les rejets permanents dans la Seine</i> .....	43
3.2.2.	<i>Les déversements de temps de pluie dans la Seine</i> .....	44
3.3.	Optimisation des rejets de temps de pluie .....	45
3.3.1.	<i>L'outil MAGES</i> .....	45
3.3.2.	<i>Évaluation du flux polluant attaché à un déversement</i> .....	45
3.3.3.	<i>Évaluation de l'impact des déversements sur la qualité de la Seine</i> .....	53
3.3.4.	<i>Évaluation d'un niveau d'oxygène dissous de référence</i> .....	61
3.3.5.	<i>Logiciels d'évaluation de la qualité de l'eau</i> .....	65
3.3.6.	<i>Adjonction d'un module qualité à MAGES</i> .....	67
	<b>Conclusion</b> .....	<b>70</b>
	<b>Remerciements</b> .....	<b>72</b>
	<b>Bibliographie et entrevues</b> .....	<b>74</b>

## Liste des tableaux

1. <i>Évaluation de la qualité de l'eau en sortie de la station du SIVSO</i> .....	22
2. <i>Teneurs limites en éléments traces dans les boues</i> .....	25
3. <i>Conformité de la Seine au Bon État écologique</i> .....	41
4. <i>Concentrations en polluants mesurées sur 3 déversoirs des Hauts-de-Seine (temps de pluie)</i> .....	46
5. <i>Saturation en oxygène dissous en fonction de la température</i> .....	55

## Liste des figures

1. Déchets au bord du marigot de Bobo-Dioulasso .....	11
2. Dépenses des ménages et des entreprises pour leurs déchets solides et liquides .....	13
3. Ligne de tri manuel de papiers .....	15
4. Recyclage d'ordinateur en Chine .....	16
5. Compost sur balcon .....	18
6. Mécanisme de mobilisation des polluants par les eaux pluviales .....	21
7. Détail d'une des unités de traitement d'Achères .....	23
8. Gazomètre associé aux digesteurs de l'usine de Valenton .....	26
9. Cycle de l'azote .....	27
10. Cycle de l'azote en assainissement .....	30
11. Graisses collectées .....	31
12. Débordement d'égout colmaté à Sarcelles .....	32
13. Toilettes pour collecte séparée des eaux-vannes sous vide à Freiburg .....	33
14. Origine des nutriments dans les eaux-vannes .....	34
15. Toilettes NoMix .....	35
16. Toilettes avec séparation de l'urine et des fèces en milieu rural .....	36
17. Risques d'écart aux objectifs de la DCE dans le bassin de la Seine .....	38
18. Points de surveillance du SIAAP .....	40
19. Flux globaux d'azote sur le bassin de la Seine .....	42
20. Flux globaux de phosphore sur le bassin de la Seine .....	42
21. Origine des pollutions en MES et DBO <sub>5</sub> à l'exutoire du quartier du Marais .....	46
22. Dépôts dans les égouts du quartier du Marais .....	47
23. Concentrations des déversements de La Briche en DBO <sub>5</sub> et NH <sub>4</sub> (2006-2007) .....	49
24. Concentrations des déversements de Clichy en DBO <sub>5</sub> et NH <sub>4</sub> (2006-2007) .....	50
25. Contributions relatives des points de rejet par temps de pluie aux volumes et flux cumulés 2 j/an .....	52
26. Hiérarchisation des principaux points de rejet en volume déversé 2x/an et en flux de DBO rejeté 2 x/an (hors STEP SIAAP) .....	52

27. <i>Points de surveillance du SIAAP</i> .....	53
28. <i>Oxygène dissous dans la Seine à Bougival et rejets de matière organique à l'étiage 2006</i> .....	58
29. <i>Oxygène dissous dans la Seine à Bougival et rejets de matière organique à l'étiage 2007</i> .....	59
30. <i>Courbe de régression de l'oxygène dissous en fonction de la température à Bougival entre 2000 et 2007</i> .....	62
31. <i>Corrélation entre l'oxygène dissous corrigé de la température et le débit à Bougival entre 2000 et 2007</i> .....	63
32. <i>Température, oxygène dissous et débit de la Seine à Bougival de 2000 à 2007</i> .....	64
33. <i>Oxygène dissous à Andrésy en temps de pluie dans 4 situations différentes</i> .....	66
34. <i>Profil en long de la Seine sur graphique par MOKA-Eau</i> .....	68
35. <i>Profil en long de la Seine sur carte par MOKA-Eau</i> .....	68

## Contexte

---

Ce rapport a été rédigé dans le cadre de mon stage de fin d'études, concluant ma formation à l'École Polytechnique et à l'École des Ponts et Chaussées (ENPC) dans le Département Ville Environnement Transport. Ce stage d'un an s'est déroulé à la Setec, bureau d'études français fondé en 1957 et regroupant aujourd'hui plus de 1.300 collaborateurs pour un chiffre d'affaires annuel d'environ 150 millions d'euros.

Les 8 premiers mois de ce stage ont été effectués au sein de la filiale Hydratec, spécialisée en ingénierie de l'eau. J'ai pu travailler principalement, en tant qu'assistant à maître d'ouvrage, sur l'analyse des offres pour l'attribution de deux marchés de stations d'épuration : la station de l'Île Arrault, pour la Communauté d'Agglomération d'Orléans Val de Loire et l'unité de post-dénitrification de Seine Aval, pour le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP). J'ai aussi participé à différentes missions durant les travaux de construction de la station d'épuration d'Ollainville pour le Syndicat Intercommunal de la Vallée Supérieure de l'Orge (SIVSO), en particulier pour le visa de plans et spécifications. Ces 3 missions étaient encadrées par François Fiévet, responsable du pôle stations d'épuration à Hydratec, Frédéric Maurel et Sébastien Delhault. Enfin, j'ai réalisé une mission d'évaluation de l'impact à court terme sur la qualité de l'eau de la Seine des rejets des déversoirs d'orage de l'agglomération parisienne sous l'encadrement de Thierry Lepelletier, directeur d'Hydratec. Les résultats de cette mission sont présentés dans la troisième partie de ce rapport.

Les derniers mois de ce stage ont été effectués au sein de la filiale Partenaires Développement, spécialisée en aménagement et développement urbain. Ma mission s'est déroulée durant deux mois à Dubaï où j'ai réalisé une étude sur la ville durable dans le cadre du projet Lyon-Dubaï City, sous la tutelle de Jean-Paul Lebas, président directeur général de Partenaires Développement.

En outre Michel Gousailles, directeur de la recherche et du développement au SIAAP, en qualité de directeur de mon projet de fin d'études mais aussi en tant que collaborateur et client au SIAAP d'Hydratec, m'a soutenu dans mon projet et dans mon travail.

C'est dans ce contexte professionnel, faisant suite à l'enseignement suivi à l'ENPC, que sont nés mon Projet de Fin d'Études et ma passion pour le thème de la gestion cyclique des déchets, des eaux usées domestiques et des eaux pluviales.

## Introduction

---

Notre société présente une dissymétrie flagrante. Elle s'évertue à produire un très grand nombre de biens, avec des moyens considérables, mais elle se donne relativement peu de moyens pour gérer ces biens une fois qu'ils ont été utilisés et qu'ils sont devenus déchets. Or les déchets, qu'ils soient solides ou liquides – on parle alors plutôt d'eaux usées – posent d'importants problèmes de pollution. Que doit-on faire de nos déchets ? Comme ils proviennent de l'abandon ou de la dégradation d'un bien, ne doivent-ils pas plutôt constituer une ressource qu'une source de pollution ?

Cette logique modifie le paradigme prévalant actuellement, où la production de biens et de déchets est conçue suivant un schéma linéaire. Or l'observation des cycles naturels amène à penser que les hommes, s'ils veulent être en paix avec la planète et assurer leur survie, doivent adopter une logique circulaire. Notre société est-elle capable de se transformer afin de suivre ce nouveau modèle ?

Nous nous intéresserons d'abord aux déchets de façon générale et à quelques concepts qui permettent d'améliorer leur gestion et de sortir d'un schéma linéaire. Puis nous traiterons le problème spécifique des eaux usées et essaierons de présenter des solutions, anciennes ou innovantes, aux problèmes rencontrés aujourd'hui par l'assainissement, tant pour la qualité de l'eau que pour la gestion des boues issues de l'épuration des eaux usées. Enfin, nous présenterons le cas difficile des rejets urbains de temps de pluie, ce lavage naturel des villes qui concentre malgré nous toutes les pollutions que nous produisons dans les rivières. Nous étudierons plus spécifiquement l'impact de ces rejets en région parisienne sur la qualité de l'eau de la Seine.

# 1. Peut-on gérer nos déchets de façon cyclique ?

---

## 1.1. Une société de consommation linéaire

Par définition, un déchet désigne « toute substance ou tout objet [...] dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (Directive Européenne du 5 avril 2006 relative aux déchets). Cette définition éclaire d'emblée sur le problème fondamental posé par le déchet : c'est un bien dont le propriétaire n'assume plus la possession. Pour qu'une société puisse correctement gérer ses déchets, il faut donc qu'elle mette en place une structure qui s'occupe de collecter et traiter tout ce dont la société ne veut plus.

La mise en place de cette structure s'avère cruciale. En effet, l'absence de gestion des déchets n'est envisageable que dans la mesure où les déchets ne seraient ni nocifs, ni gênants pour les activités humaines. Ainsi, la plupart des déchets ne sont pas gênants dans les sociétés humaines s'ils sont peu élaborés par rapport aux matières premières environnantes ou facilement biodégradables. Ainsi, les déchets de taille de silex des hommes préhistoriques, hormis leur aspect tranchant, ne posent pas de problème à être laissés sur place, non plus qu'un trognon de pomme dans une forêt.

En revanche, les déchets organiques, s'ils sont mal gérés, peuvent être vecteurs de graves maladies. La mise en place du réseau d'égouts à Paris par Belgrand à la fin du XIXe siècle était alors vitale. Avec son réseau d'égouts à ciel ouvert dans les rues, Paris était alors dans des conditions sanitaires désastreuses et les maladies se répandaient aisément dans la population. La grave épidémie de choléra de 1832 tua ainsi plus de 15 000 habitants (SIAAP). De même, la multiplication des déchets non-biodégradables, telles que les matières plastiques, pose d'évidents problèmes dans tous les pays où les biens de consommation sont importés sans importation du savoir-faire de gestion de ces futurs déchets. La photo ci-dessous, prise sur les berges du marigot qui coule au milieu de la ville de Bobo-Dioulasso, au Burkina Faso, illustre bien ce problème.



Source : Fabien Esculier

### *Déchets au bord du marigot de Bobo-Dioulasso*

Cette photo synthétise un grand nombre de caractéristiques des déchets : on y voit qu'ils provoquent une pollution visuelle et qualitative du milieu mais on constate aussi que les déchets des uns sont les produits des autres, ici le cochon se nourrissant des restes de repas jetés sur les berges du fleuve. Le déchet est donc une notion subjective. C'est ce qui conduit à la difficulté de savoir classer les déchets et de légiférer sur les déchets. Ainsi, M. Wicker avait proposé comme sujet de réflexion pour son cours « Déchets et sites pollués » de l'ENPC, la recherche d'un cadre juridique permettant de mieux définir les déchets. Ce travail avait permis à ses élèves de réfléchir à des dénominations plus précises, telles que :

- sous-produit : déchet issu d'un processus de fabrication utilisé dans une autre application ;
- déchet ultime : déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. (Code de l'Environnement Article L-541-1 – III).

Malheureusement, ces constats semblent encore largement absents de la conscience collective de nos sociétés. Nous vivons en effet dans une société où le salaire nous permet d'acheter des biens auxquels nous attribuons de la valeur. En revanche, qui a le sentiment, en jetant un objet, de confier ce déchet à une structure qui va s'en occuper et chercher à le valoriser le mieux possible ? Certainement pas tous les gens que nous pouvons voir jeter tout et n'importe quoi par la vitre ouverte de leur voiture ou même par leur fenêtre<sup>2</sup>. De même, l'attitude des fumeurs vis-à-vis de leur mégot est encore loin d'être responsable. À ce sujet, une action a été lancée par la mairie de Paris qui distribuera « 30.000 cendriers de poche dans 140 lieux de sortie, pour que les fumeurs adoptent de nouveaux comportements respectueux de l'environnement ». Cette campagne est louable mais les mégots ne sont toujours pas considérés comme un déchet à mettre ailleurs qu'au caniveau.

---

<sup>2</sup> M. Jean-Luc Tamen, ingénieur à Hydratec, me racontait qu'il avait vu dans un village, alors qu'il travaillait sur la qualité de l'eau de la rivière, des riverains qui ne voulaient pas s'embarrasser à descendre la poubelle au rez-de-chaussée et la jetaient donc directement dans la rivière !

Or, tous ces déchets n'étant que les sous-produits d'une nouvelle entité qui va les prendre en charge, éventuellement la nature, il conviendrait de considérer tout déchet comme une ressource. Cette vision est bien illustrée par la publicité faite par l'entreprise dubaïote ETA Ascon Group et sa filiale de traitement des déchets Zenath :

« Waste becomes waste only when it is wasted »

« Un déchet ne devient déchet que s'il est gâché »

## 1.2. Faire des déchets une ressource

Cette conception cyclique du déchet qui devient sous-produit est toutefois déjà largement présente en France, en particulier dans le monde industriel. En effet, si un déchet peut être réutilisé, c'est qu'il possède de la valeur pour quelqu'un d'autre. Ce raisonnement n'a pas échappé à la plupart des industriels et artisans qui cherchent à maximiser leur profit en faisant en sorte de vendre leurs déchets. Un casseur coco<sup>3</sup>, rencontré sur l'île de la Réunion, cherchait ainsi à vendre ses écorces de noix de coco, inutiles aux buveurs de lait de coco mais qui font un très bon engrais. Sa difficulté à trouver un acheteur illustre d'ailleurs que cette valorisation n'est pas toujours évidente car le gain à la valorisation peut être inférieur au coût de transport du sous-produit, au coût d'une autre matière première équivalente, au coût de prétraitement du sous-produit, etc.

Il existe même une branche d'activité lucrative fondée sur le recyclage : la récupération. La récente montée du cours des matières premières a largement favorisé ce secteur qui voit son nombre d'entreprises et son chiffre d'affaire fortement progresser. Début 2006, environ 4.000 entreprises interviennent dans ce secteur. Elles ont collecté 39 millions de tonnes de matières recyclables et cumulent un chiffre d'affaire de 7 milliards d'euros (IFEN, *Rapport sur l'économie de l'environnement en 2006*). Ces matières sont d'ailleurs exportées pour presque un quart. La France devient donc paradoxalement producteur de métaux grâce à ses filières de récupération.

La valeur des gisements potentiels de récupération en France est difficile à appréhender mais, afin de sensibiliser le public à la valeur de nos déchets, il conviendrait de présenter ces gisements comme une ressource française. Ainsi, à la quantité de matières premières contenues dans les mines françaises devrait être ajoutée les futurs déchets qui contiennent aussi cette matière. La carte de France des ressources en matières premières serait alors fortement changée et montrerait que la France est un pays riche en matières premières par le potentiel de ses futurs déchets. La présentation d'une telle carte aux enfants à l'école permettrait de leur faire prendre confiance de la valeur des déchets et aiderait à les concevoir comme une ressource.

La mise en place du recyclage dans les foyers permet certes d'ores et déjà de sensibiliser la population aux ressources de nos déchets. Ce recyclage, même s'il fut tardivement mis en place par rapport à certains de nos voisins, concernait désormais en 2006 la quasi-totalité de nos communes. Seules 700 communes représentant 700.000 habitants ne

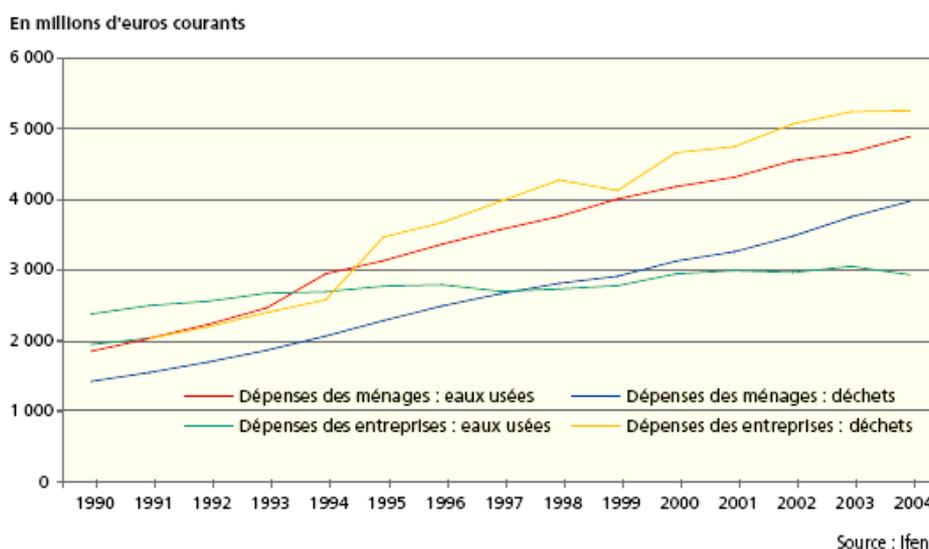
---

<sup>3</sup> Casseur coco est un métier dont il n'existe qu'une poignée de représentants à la Réunion. Le casseur coco est appelé par les municipalités ou les particuliers quand leurs cocotiers ont des noix mûres qui risquent de causer un accident en tombant. Le casseur coco monte alors à l'arbre avec son couteau dans le dos et fait tomber les noix de coco qu'il vend par la suite au marché pour leur lait. On peut rencontrer le très sympathique casseur coco Sylvain sur le marché de Saint-Paul.

disposaient pas de la collecte sélective (IFEN, *ibid.*). Il semble toutefois qu'il y ait encore des voies d'amélioration à la mise en place des filières de recyclage.

En effet, les recettes tirées de la vente des matériaux gérés par les filières de recyclage restent généralement inférieures aux coûts d'élimination de ces produits. D'après l'IFEN, en 2004, les ménages ont dépensé 3,6 milliards d'euros pour la Taxe d'Enlèvement des Ordures Ménagères (TEOM). Cette même année, les recettes de valorisation des déchets ont rapporté environ 230 millions d'euros en valorisation énergie et 90 millions en valorisation matière. La valorisation des ordures ménagères ne permet donc de couvrir que 10% des coûts. Ceci constitue un frein à la collecte sélective et au recyclage. Les collectivités demandent ainsi une participation plus importante des producteurs de manière à couvrir totalement les coûts qu'elles supportent et à favoriser davantage la collecte sélective.

Ce problème des coûts du traitement des déchets est d'ailleurs fortement ressenti par la population. Les dépenses des ménages pour l'assainissement des eaux usées et la gestion des déchets ont en effet augmenté de 7,2 % par an, en valeur, depuis 1990, contre 3,2 % pour l'ensemble de la consommation (IFEN, 4 pages numéro 111 et graphique ci-dessous).



#### *Dépenses des ménages et des entreprises pour leurs déchets solides et liquides*

Cette hausse est expliquée ainsi : un tiers est dû à la réglementation imposant de remplacer les procédés vétustes par des procédés plus respectueux de l'environnement (mise aux normes des stations d'épuration, des usines d'incinération et des centres de stockage), un autre tiers à l'augmentation de la quantité de déchets produits, et le dernier tiers à l'inflation. D'après l'IFEN, la mise en place des filières de recyclage semble donc jouer un rôle relativement mineur dans cette hausse des coûts de traitement des déchets. Elle n'en reste pas pour autant déficitaire et présente quelques inconvénients.

En effet, la collecte sélective multiplie les transports de déchets car les 3 ou 4 camions des collectes sélectives engendrent un trafic supérieur à celui de l'unique camion précédent. L'amélioration du taux de collecte des déchets, s'il est très bénéficiaire pour l'environnement, entraîne aussi une augmentation du trafic. Toutefois, en termes de coûts, il est difficile de mettre un prix à la protection de la nature apportée par cette meilleure gestion de nos déchets. Un certain nombre de chercheurs s'attellent à ce problème, tels l'expert qui a été nommé dans l'affaire du naufrage Erika pour évaluer le préjudice de la pollution des côtes françaises par ce

naufage. La Caisse des Dépôts a aussi mis en place un système permettant de chiffrer la compensation écologique. Ce système consiste à inventorier les fonctions écologiques mises à mal par un projet et à chiffrer le coût de l'aménagement d'un espace permettant de recréer, certes imparfaitement, ces mêmes fonctions écologiques. Si cette méthode est imparfaite, elle permet au moins de mettre un chiffre au lieu de 0 au prix de la nature. Le chiffrage du gain environnemental de la meilleure collecte et du tri des déchets reste toutefois délicat à mener.

Pour permettre une gestion cyclique de nos déchets, la prise en compte de ce cycle dans les coûts s'impose. C'est ainsi qu'ont été créées les filières agréées du type Éco-emballage qui permettent de faire peser le coût du recyclage sur le producteur en lui imposant une taxe. Cette taxe se généralise pour un grand nombre de produits. Toutefois, une meilleure gestion du cycle de nos produits doit aller plus loin et modifier la conception même de nos produits afin de faciliter leur traitement ultérieur. Ce principe est usuellement appelé l'éco-conception.

### **1.3. L'éco-conception**

Notre société doit effectivement aller plus loin que la collecte sélective en agissant encore plus en amont et en concevant des produits qui, en fin de vie, pourront être valorisés de la façon la plus efficace possible. Le recyclage, par exemple, est grandement facilité lorsque les matériaux mis en jeu sont simples et constitués d'une seule matière. L'éco-conception des produits à recycler entraîne donc a priori deux voies d'évolution : la capacité à créer des produits de composition simple ou la capacité à réutiliser facilement des produits de composition complexe, à appréhender la diversité.

Or j'ai vécu cette année une expérience riche qui illustre la difficulté de l'éco-conception : la mise en place du tri du papier à Hydratec. En effet, j'étais, comme beaucoup de personnes à Hydratec, choqué de constater que cette société dont le métier est tant lié à l'environnement ne pratiquait pas le tri du papier. Un concours de circonstances m'a permis de rencontrer des personnes de la filiale Setec AS qui pratiquaient eux ce recyclage. Avec leur aide et suivant leur exemple, j'ai donc pu organiser la mise en place d'une filière de recyclage du papier à Hydratec.

Or le recyclage du papier, s'il peut paraître relativement simple à première vue, s'est avéré d'une grande complexité en pratique. En effet, la valorisation du papier se fera différemment selon qu'il s'agit d'un papier de fond blanc ou de couleur, de papier de qualité journal ou papier d'impression, si c'est un papier imprimé en noir et blanc ou en couleurs, etc. Les papiers à jeter à la poubelle sont aussi mélangés avec un grand nombre d'autres produits : de la colle pour les enveloppes ou les reliures, des Post-it®, des agrafes, des trombones, des intercalaires plastiques ou cartonnés, des photos, du scotch, etc. Tout ceci complique encore la collecte et nécessite, soit un grand travail de tri de la part de l'entreprise de recyclage, soit une implication et un sérieux de la part des consommateurs de papier.



*Ligne de tri manuel de papiers*

Source : Association Ligérienne d'Insertion Sociale par l'Emploi

Un des points importants de la mise en place de ce tri a donc été la définition claire des produits tolérés ou non dans les bacs de recyclage de papier. À ce sujet, la population manque d'informations précises sur les produits pouvant être mis dans les poubelles de recyclage. On voit encore un grand nombre de personnes qui ne savent pas si tel ou tel produit doit être lavé avant d'être mis à la poubelle, s'il est recyclable ou non tel quel, etc.

Ainsi, en complément des livrets et pancartes d'information qui sont déjà parfois assez complètes, il conviendrait que les municipalités mettent en place, en fonction des usines de recyclage qu'elles ont, une information beaucoup plus exhaustive sur le recyclage des produits afin de permettre de mieux guider l'utilisateur. Car en pratique, les produits que nous mettons à la poubelle sont souvent des hybrides des produits types indiqués. L'idée d'un service téléphonique a été glissée à l'oreille de la directrice de la communication du centre de tri d'Ivry-Paris XIII avec un accueil favorable. Espérons qu'il soit effectivement mis en place et étendu à tous les centres de tri du territoire !

Quoi qu'il en soit, le tri à la source des déchets reste une nécessité afin de rendre le recyclage possible. En effet, une fois qu'un papier a partagé la même poubelle qu'un trognon de pomme, sa revalorisation devient difficile. Le choix des matériaux qui entrent dans la composition des produits est aussi d'une grande importance. Ainsi, il est étonnant que les pots de yaourts soient majoritairement fabriqués avec des plastiques qui ne permettent pas leur recyclage. Les pots de yaourt en verre sont certes plus lourds et posent donc d'autres problèmes à ce titre mais l'éco-conception devrait apporter une réponse à ce type d'inconvénient en trouvant un optimum d'emballage des produits qui prend aussi en compte sa revalorisation future.

Il est d'ailleurs possible d'aller encore plus loin dans la responsabilité élargie du producteur, comme le montre l'exemple des locations de voitures longue durée, en ne transférant pas la possession, et la responsabilité qui va avec, aux consommateurs. L'utilisateur a en effet rarement besoin d'être possesseur d'un bien car il est souvent plus concerné par son usage que par sa possession. C'est le principe même de l'emballage que le consommateur n'achète que parce qu'il lui permet de transporter le produit emballé mais non parce qu'il souhaite posséder cet emballage (ce qui arrive parfois mais dans ce cas, l'emballage est conservé et ne devient déchet que bien plus tard). Ainsi, pour les voitures, même si leur possession est souvent importante pour leur propriétaire, elles ne servent usuellement que comme moyen de locomotion. La location longue durée permet donc qu'elles soient toujours possédées par le constructeur et que le conducteur ne jouisse que de ce dont il a réellement besoin : l'usage de la voiture. Ce système permet d'inclure totalement dans le

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

coût de la voiture son coût de maintenance et de recyclage pour le producteur. Ceci l'incite donc à l'éco-conception, à produire un objet qui dure, qui nécessite peu de maintenance et qui soit simple à revaloriser. Ce système pourrait avantageusement être étendu à d'autres biens de consommation. C'est par exemple déjà le cas avec les vélos en libre service.

L'éco-conception trouve toutefois ses limites car la simplicité des composants d'un produit ou l'appréhension de leur diversité ne sont pas nécessairement aisées à atteindre. Les produits que nous utilisons se complexifient et impliquent donc des filières de fabrication et de valorisation de plus en plus complexes. La gestion cyclique de ces produits finit ainsi peut-être par trouver sa limite.

#### 1.4. Les limites de la gestion cyclique de nos déchets

Les matériaux que nous utilisons suivent des cycles de concentration et de diffusion. Ainsi, les métaux sont d'abord extraits de mines où ils sont souvent à des concentrations inférieures à 1%. Ils sont donc dans la nature dans un état diffus. Or, en les extrayant des mines, l'homme cherche à les concentrer afin d'utiliser leurs propriétés particulières sous forme pure. Une fois extraits, les métaux passent donc à un état concentré, proche de 100% où ils vont pouvoir être facilement transportés et utilisés pour leurs propriétés.

Ensuite, ils sont à nouveau diffusés dans les produits où ils sont utilisés, tels les ordinateurs, les batteries, les voitures, etc. Ainsi, dans une décharge, la situation est à peu près similaire à celle d'une mine : tous métaux sont à nouveau dans un état diffus et le travail du récupérateur s'apparente à celui du mineur, en ceci qu'il cherche à remettre ces métaux dans un état concentré. Ce travail est parfois effectué dans des conditions catastrophiques quand les récupérateurs ne sont pas protégés contre les dangers de leur métier. Comment pourrait-on simplifier ce cycle de diffusion/concentration ?

##### *Recyclage d'ordinateur en Chine*



Source : blog du deuxième tiroir

L'idéal serait de réussir à utiliser les matériaux trouvés dans la nature tels quels. Tout le travail de concentration/diffusion n'est alors plus à faire. En outre, avec l'exemple des métaux, on constate bien que l'homme lutte contre la nature car les métaux, presque toujours sous forme oxydée dans la nature, sont réduits dans les hauts-fourneaux, et le temps les oxyde ensuite petit à petit, ce contre quoi l'homme déploie des trésors d'imagination. Y a-t-il une voie qui nous permette de conserver les atouts de notre confort et de nos succès technologiques tout en respectant ces cycles naturels ?

La question reste ouverte. Il est en tout cas parfois déroutant de constater que nous avons construits dans les années 60 en France des logements dont l'isolation thermique était beaucoup moins bonne que beaucoup de logements construits très longtemps auparavant avec des matériaux très simples. Les avancées technologiques ne sont pas toujours nécessairement synonymes de progrès. Notons toutefois un exemple intéressant : celui d'un nouveau béton

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

commercialisé par Lafarge, le Ductal®. Dans la composition de ce béton entrent de fines aiguilles de fer qui jouent, au niveau microscopique, le même rôle que les armatures du béton traditionnel. Ainsi, le Ductal® est coulé sans armatures et il n'y a donc qu'un seul produit utilisé. En outre, ce béton est réutilisable tel quel lors de la destruction d'un bâtiment construit en Ductal®. C'est ce qui explique son actuelle popularité dans les constructions qui se veulent écologiques. De telles innovations sont à encourager mais beaucoup de recherches sont encore à entreprendre pour étendre ce principe à tous les produits que nous utilisons.

On ne peut que se réjouir aujourd'hui de voir la prise de conscience collective de l'importance d'une bonne gestion des déchets. Peut-être pouvons-nous espérer voir un jour les métiers des déchets devenir aussi estimés que ceux de la production industrielle ? Ces deux métiers ne sont en effet que le miroir l'un de l'autre mais on est aujourd'hui bien loin de l'équité. Les métiers du déchet sont encore soumis à de nombreux dangers, entre autres dus au non-respect de la population qui jette des seringues ou du verre coupant à la poubelle ou dans les égouts. Certes, des améliorations ont été apportées depuis le début du siècle où un tiers des égoutiers mourait au bout de 10 ans de métier (*Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine*). Toutefois, dans un bureau d'étude comme celui de la Setec, il est frappant de constater que les salaires les plus bas sont ceux des filiales environnementales : Hydratec, et encore après, Cadet International, la filiale qui travaille sur les déchets.

Pour autant, on peut espérer que la pédagogie mise en place par l'ADEME (« réduisons nos déchets, ça déborde ! ») et la plupart des municipalités finisse par porter ses fruits. L'éducation est a priori un des meilleurs leviers pour agir dans ce sens. Les quatre axes de la politique française des déchets réaffirmée lors du Grenelle de l'Environnement sont encourageants :

- « - réduire la production de déchets en favorisant l'éco-conception, la durée de vie des produits, la mise sur le marché de produits générant peu de déchets et développer la mise en place d'une tarification incitative. Le principe de la responsabilité élargie du producteur (REP) est réaffirmé, celui-ci est responsable de l'élimination de ses produits et contribue à son financement ;
  - développer le recyclage et la valorisation organique ;
  - mieux connaître les impacts sur la santé des modes d'élimination des déchets et mieux les contrôler ;
  - renforcer la concertation, la sensibilisation des acteurs et du public concernés par les déchets et donner une nouvelle impulsion à la recherche. »
- (IFEN, *Rapport sur l'économie de l'environnement*)

Les ressourceries, développées depuis longtemps au Canada et en Belgique, apparaissent désormais en France et sont aussi prometteuses. Ce sont des associations qui récupèrent des déchets et en refont des objets, souvent artistiques mais aussi utilitaires, qu'ils revendent. Ainsi, la ressourcerie *L'Interloque* dans le XVIII<sup>e</sup> arrondissement de Paris a récupéré 42 tonnes de déchets en 2006 et en a valorisé 34.

Le compost des déchets organiques entre aussi dans les mœurs, même dans les villes denses. Ainsi, à Paris, il suffit d'un petit balcon pour composter ses déchets organiques et obtenir ainsi une source gratuite d'engrais pour ses plantes. Le compost permet de réduire d'environ un tiers la masse de ses déchets et de rendre sa poubelle plus propre et non odorante ! La photo ci-dessous, prise sur mon balcon, donne une illustration de compost urbain. Ce compost artisanal ne génère en plus aucune mauvaise odeur. Ainsi, certains composteurs à lombrics sont même prévus pour une utilisation intérieure.



Source : Fabien Esculier

### *Compost sur balcon*

Notons aussi l'exemple remarquable du 107 rue de Reuilly, dans le XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris. Dans cette résidence de 600 logements dotée d'espaces verts, un des résidents a pris l'initiative d'organiser du compostage collectif. Cette démarche, outre ses atouts environnementaux, est aussi créatrice de lien social en regroupant des voisins autour d'un projet collectif (blog de Jean-Jacques Fasquel).

La population se sent donc de plus en plus concernée par les problèmes liés aux déchets. À la Setec, la sensibilité à cette problématique a permis de mettre en place en quelques mois diverses filières de recyclage et, entre autres, une filière de recyclage du papier commune à toute la tour.

La gestion de nos déchets devrait donc être un des défis de ce siècle. Beaucoup de réformes seront encore à apporter quant à notre mode de vie. Espérons que le secteur des déchets, qui est un des piliers du développement durable, gagne des lettres de noblesse et de la considération de la part de la population.

## 2. Application de la gestion cyclique aux eaux usées

---

### 2.1. Composition des eaux usées

L'exposé précédent traitait des déchets de façon générale, voyons désormais comment les quelques notions présentées ci-dessus s'appliquent aux eaux usées. Les eaux usées désignent ici tous les déchets qui sont évacués dans une canalisation, le plus souvent dilués dans une certaine quantité d'eau. Dans les grandes villes françaises, ces canalisations rejoignent usuellement un réseau d'égouts qui amène cette eau et ces déchets à une station d'épuration qui va traiter cette eau usée avant son rejet au milieu naturel. Afin d'étudier les cycles mis en jeu dans la gestion de ces eaux usées, étudions tout d'abord la composition des eaux usées.

Les eaux usées sont de trois types :

- les eaux usées domestiques qui comprennent les eaux ménagères (lessives, cuisine, toilette, etc.) et les eaux vannes (urines et matières fécales) ;
- les eaux industrielles, qui correspondent à tous les rejets issus d'une utilisation de l'eau autre que domestique ;
- les eaux pluviales qui proviennent des précipitations atmosphériques.

#### 2.1.1. Les eaux usées domestiques

L'étude de la composition des eaux usées domestiques s'avère la plus simple. Il suffit en effet de considérer les évacuations d'eau d'une maison et de lister ce qui y transite. Raisonnons par sections et simplifions aux rejets usuels :

##### A. Toilettes

- urine
- matières fécales
- papier toilette
- détartrant/désinfectant

##### B. Lavabo, douche, bidet

- sécrétions corporelles
- poils
- savon

##### C. Cuisine

- graisses
- aliments
- savons

##### D. Machine à laver

- graisses
- savons
- détergents

*E. Siphon de sol*  
- poussières

Cette liste est très simpliste et ne se veut pas exhaustive mais nous voyons déjà que les eaux usées domestiques contiennent une variété importante de déchets ce qui laisse présager la difficulté de les valoriser par la suite.

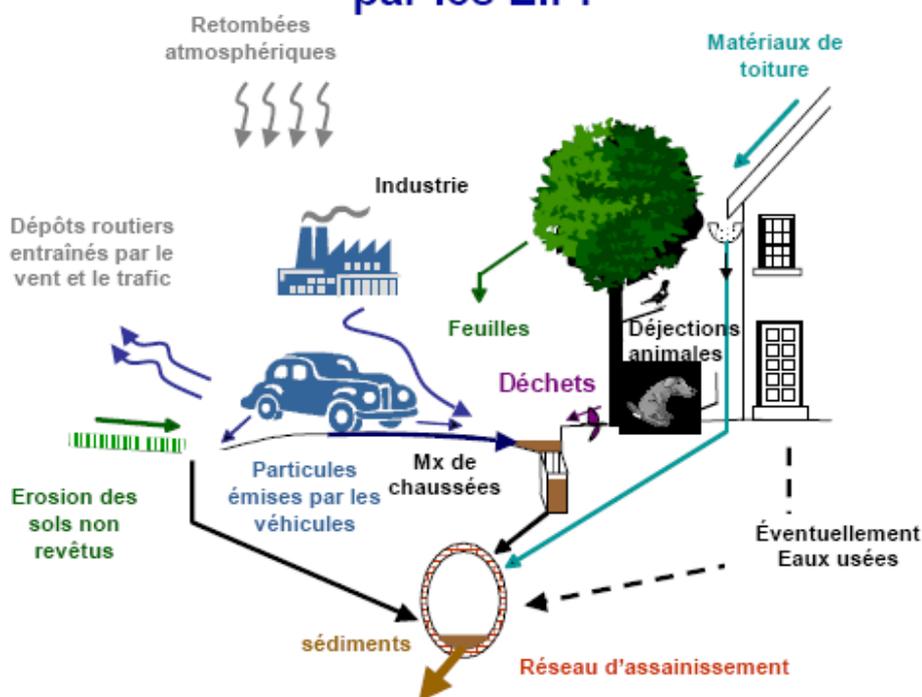
### **2.1.2. Les eaux industrielles**

Nous ne détaillerons pas la composition des eaux industrielles car celles-ci peuvent être de natures très diverses. L'article L1331-10 du Code de la Santé Publique impose que les rejets d'eau industrielle aux égouts municipaux soient soumis à autorisation de la municipalité. En théorie, la non-conformité des eaux industrielles aux normes de la municipalité impose un traitement des eaux industrielles qui les rend similaires en composition aux eaux domestiques. On pourrait donc laisser de côté le problème des eaux industrielles... si toutefois cette réglementation était correctement respectée. On trouve en effet un grand nombre de rejets d'eau industrielle non conformes mais dont il n'est pas toujours aisé de trouver la provenance. Par exemple, les restaurants doivent être munis de séparateurs de graisses efficaces afin d'éviter de les rejeter au réseau mais ce n'est pas toujours le cas. Les rejets ponctuels de matières dangereuses sont aussi fréquents et très difficiles à contrôler.

### **2.1.3. Les eaux pluviales**

Les eaux pluviales ne contiennent malheureusement pas que de l'eau, ni avant, ni après avoir ruisselé. Le graphique ci-dessous, tiré de la présentation faite à Lyon-Villeurbanne par Sylvie Barraud (OTHU - URGC - INSA Lyon) et Bruno Fouillet (ISPB Faculté de Pharmacie de Lyon - UCBL Lyon I) explique les mécanismes de mobilisation des polluants par les eaux pluviales.

## Mécanismes de mobilisation des polluants par les E.P.



Source : Sylvie Barraud et Bruno Fouillet

### *Mécanisme de mobilisation des polluants par les eaux pluviales*

Toujours d'après ces mêmes auteurs, 15% à 25% des polluants des eaux pluviales sont déjà présents avant que les eaux météoriques arrivent au sol. Puis 75% à 85% sont dus au ruissellement. Ces déchets sont de nature très diverses :

- métaux provenant des industries, des toitures, des pneus, plaquettes de freins, peintures et essences de voitures, etc. ;
- matières organiques dont des hydrocarbures de diverses origines ;
- nutriments (azote, phosphore, etc.) provenant des déjections animales, des engrais, etc. ;
- des bactéries et virus ;

La bonne gestion des eaux pluviales représente un enjeu considérable. Ainsi, si l'on se limite aux boues pluviales issues des bassins de décantation du réseau routier français, ce sont 5 600 000 tMS/an qui sont récoltées contre 1 000 000 tMS/an issues des stations d'épuration d'eaux résiduaires urbaines (thèse de C. Durand, 2003). Et il est difficile de valoriser ces boues vu les teneurs en métaux lourds, hydrocarbures, huiles, caoutchoucs, phénols, benzopyrènes, etc. La gestion des eaux pluviales en milieu urbain pose aussi un grand nombre de problèmes, en particulier en région parisienne, où le réseau unitaire est aujourd'hui dimensionné de telle manière que les déversements de mélange d'eaux usées et d'eaux pluviales sont fréquents, parfois très conséquents et avec des dommages certains sur l'environnement. Cette problématique sera spécifiquement étudiée dans la troisième partie.

## 2.2. Gestion de la diversité des composants des eaux usées

De même que pour les déchets solides, notre société doit donc mettre en place des systèmes capables de prendre en compte la diversité des déchets des eaux usées et de les

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

traiter. En milieu urbain, ce système est aujourd'hui matérialisé par un réseau d'égouts, séparatif ou unitaire<sup>4</sup>, qui amène ces eaux usées à une station d'épuration. Nous nous cantonnerons ici à la gestion des eaux usées en milieu urbain.

L'historique de la gestion des eaux en région parisienne du Musée des Égouts de Paris apporte un très bon éclairage sur l'évolution des pratiques d'assainissement entre la période gallo-romaine où la gestion des eaux usées semblait acceptable, le Moyen-Âge où le déséquilibre écologique entre la capacité épuratoire de la Seine et le nombre d'habitants a commencé à se faire sentir, enfin les travaux de Belgrand à la fin du XIXe siècle puis la création de la station d'épuration d'Achères au milieu du XXe siècle. On pourra avantageusement le visiter pour plus d'informations.

Historiquement, ce système est conçu et perçu comme un outil de salubrité publique et de protection de l'environnement, plus que comme un outil de gestion de déchets. Le réseau d'égout et la station d'épuration doivent en effet permettre de canaliser les eaux usées et de les traiter avant leur rejet au milieu naturel afin de ne pas détériorer la qualité de celui-ci. Les stations d'épuration sont donc avant tout des systèmes à assainir l'eau et non des systèmes de traitement de déchets.

### 2.2.1. La station d'épuration : une usine à assainir l'eau

Les progrès réalisés dans le domaine du traitement des eaux usées ont donc été immenses. La France, tout particulièrement, possède un savoir-faire de renommée mondiale sur le traitement des eaux usées que ses entreprises mettent en œuvre à l'étranger. Les stations d'épurations ont désormais atteint une grande sophistication qui permet de rejeter au milieu naturel une eau presque aussi propre qu'on le souhaite. Le développement actuel des technologies membranaires d'ultrafiltration (usines en construction du SIVSO et de l'Île Arrault) permet d'atteindre une qualité d'eau en rejet remarquable. Le tableau ci-dessous présente l'analyse du rejet garanti de l'usine du SIVSO par rapport aux critères du Bon État écologique et de l'évaluation SEQ-Eau (cf. troisième partie pour une présentation de ces grilles). Ces critères étant des garanties, on peut supposer que la station en fonctionnement sera encore meilleure.

Paramètre	Rejet garanti de l'usine du SIVSO	Limite du Bon État écologique	Évaluation du SEQ-Eau
DBO5 (mg O2/l)	10	6	Passable
DCO (mg O2/l)	50	30	Mauvais
MES (mg/l)	5	50	Très bon
NK (mg N/l)	5	2	Mauvais
NGL (mg N/l)	10	> 11*	Bon
Pt (mg P/l)	0,4	0,2	Passable

\* Ce critère n'existe pas pour le bon état écologique mais il vaut déjà 11mgN/l pour les nitrates

Source : Fabien Esculier

### Évaluation de la qualité de l'eau en sortie de la station du SIVSO

<sup>4</sup> Un réseau séparatif désigne un réseau double : un pour les eaux usées domestiques, l'autre pour les eaux pluviales. Le réseau unitaire mélange ces eaux. On l'appelle aussi tout-à-l'égout.

A Singapour, les usines NEWater traitent depuis 2002 les eaux usées par osmose inverse puis traitement UV avant de s'en servir pour l'industrie et... comme source de production d'eau potable ! Cependant, si ces stations d'épuration permettent la production d'une eau de très bonne qualité, sont-elles pour autant la réponse optimale à la gestion des déchets présents dans les eaux usées ?

En effet, la station d'épuration produit certes de l'eau de qualité souvent correcte mais elle produit aussi divers types de boues, des sables, des graisses et des refus de dégrillage. Comme le dit M. Jean-Pierre Bouvet du Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), le défi du traitement des eaux usées réside plus aujourd'hui dans la gestion des boues que dans l'obtention d'une eau de bonne qualité. En termes de valorisation de déchets, la station d'épuration ne fait souvent que reporter le problème sur les boues. Et l'amélioration de la qualité de l'eau en sortie va de pair avec l'augmentation de la quantité de boues. Or, selon la qualité et la destination finale de ces boues, une qualité d'eau irréprochable est-elle globalement optimale ?

Avec les technologies membranaires, l'eau en sortie d'usine d'épuration peut en effet être de meilleure qualité que le milieu récepteur sur certains paramètres tels les MES. En outre, le retrait des nutriments azotés et phosphorés des eaux usées peut parfois s'avérer inutile pour la qualité de l'eau de la rivière réceptrice au regard des quantités d'engrais qui sont entraînées à la rivière par des exploitations agricoles environnantes. Ainsi, le Groupe de RÉflexion sur la gestion des BArrages Réservoirs (GREBAR) estimait qu'en 1991, les rejets azotés en amont de Paris d'origine diffuse étaient de 45 000 t d'azote contre 15 000 t d'azote d'origine domestique ou industrielle.

Or les stations d'épuration sont désormais de véritables usines, consommatrices d'énergie et de réactifs chimiques, ce qui entraîne un impact environnemental conséquent. À titre d'exemple, la station d'épuration de l'Île Arrault, qui traitera les effluents de 95.000 équivalents-habitants par ultra-filtration, a une consommation électrique garantie de 6,2 GWh/an. Ceci correspond à une consommation électrique par habitant et par an de 65 kWh/hab/an ce qui représente environ un tiers de la consommation annuelle d'un frigo (d'étiquette énergie A bien sûr) et un coût d'environ 3,3 €/hab/an. Une technologie non-membranaire consomme 2 à 3 fois moins d'énergie électrique.



*Détail d'une des unités de traitement d'Achères*

Source : Hydratec

Quant aux réactifs, ils sont très variés mais on peut citer, parmi les plus courants, le chlorure ferrique, la chaux, les polymères, l'eau de javel, divers acides et bases ainsi que le méthanol dont nous développerons ci-dessous les particularités. Outre les risques qu'ils représentent, certains réactifs sont chers et délicats à produire et à transporter. On les retrouve aussi dans les boues, en particulier le fer du chlorure ferrique, ce qui altère la qualité des boues. Notons que l'usine de Valenton rencontre un sérieux problème d'échauffement de ses boues stockées à cause de ce fer.

Ainsi, une vision plus globale du rôle des stations d'épuration amène à penser qu'elles ne sont peut-être pas l'outil idéal d'une gestion raisonnée de nos eaux usées. Leur impact environnemental et leur consommation énergétique vont grandissants mais quelle valorisation des déchets permettent-elles ?

### **2.2.2. Devenir des boues**

Quand les premiers réseaux ont été construits à Paris, la valorisation des boues se faisait relativement bien car les eaux usées, constituées principalement de déchets organiques, étaient épandues sur des champs d'épandage. Ces déchets organiques suivaient donc le même cycle que dans la nature : ils servaient d'engrais à des végétaux. Cependant, l'épandage des eaux usées présentait plusieurs problèmes. Tout d'abord, une partie des eaux allait à la Seine et celle-ci recevait donc une quantité de matière organique beaucoup plus grande que ses capacités d'auto-épuration lui permettaient de recevoir. Il s'en suivit donc une dégradation de sa qualité ou plutôt un déplacement du lieu de dégradation de sa qualité. Au lieu que l'eau de la Seine soit de mauvaise qualité à Paris, elle était désormais de mauvaise qualité à partir d'Achères. Ensuite, l'exploitation de ces champs d'épandage se faisait dans des conditions sanitaires dangereuses car les eaux usées sont un milieu de développement des bactéries et virus avec lesquelles les paysans étaient alors très facilement en contact.

Des techniques de séchage des boues sont alors apparues, et se développent toujours, qui permettent de récupérer de l'eau assainie d'une part, et des boues de siccité assez élevée d'autre part. On peut alors transporter ces boues pâteuses ou quasi-solides pour les épandre sur les champs dans de meilleures conditions de salubrité.

Cependant, avec les évolutions techniques, la composition des eaux usées a largement évolué. En région parisienne, où les eaux usées sont mélangées aux eaux pluviales, le développement de la voiture a introduit un grand nombre de micropolluants dans les eaux usées. L'épandage des boues pour l'agriculture présente alors des risques de contamination des sols et, si les produits qui sont cultivés sont destinés à l'alimentation, des doutes pèsent quant à leur éventuelle nocivité pour l'homme. La réglementation impose des teneurs limites en métaux lourds dans les boues destinées à l'épandage mais certains produits ne sont pas concernés par la réglementation et il est très délicat de juger de leur nocivité pour l'homme. Le tableau suivant indique les teneurs limites en éléments traces dans les boues fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles. Les contraintes fixées par cet arrêté sont nombreuses et contraignantes et ce tableau ne montre qu'une partie des contraintes fixées.

Éléments-traces	Valeur limite dans les boues (mg/kg MS)	Flux maximum cumulé, apporté par les boues en 10 ans (g/m <sup>2</sup> )
Cadmium	20 (1)	0,03 (2)
Chrome	1 000	1,5
Cuivre	1 000	1,5
Mercure	10	0,015
Nickel	200	0,3
Plomb	800	1,5
Zinc	3 000	4,5
Chrome + cuivre + nickel + zinc	4 000	6

(1) 15 mg/kg MS à compter du 1er janvier 2001 et 10 mg/kg MS à compter du 1er janvier 2004

(2) 0,015 g/m<sup>2</sup> à compter du 1er janvier 2001.

Source : Hydratec

### *Teneurs limites en éléments traces dans les boues*

Ainsi, en Suisse, par mesure de précaution, il a été décidé que toutes les boues de stations d'épuration seraient incinérées. Si les boues permettent alors une valorisation énergétique par leur incinération, il faut toutefois fournir une grande quantité d'énergie pour en retirer l'eau auparavant. Il peut sembler contradictoire de vouloir brûler les déchets contenus dans les eaux usées mais cette technique présente une grande sûreté sanitaire en concentrant les polluants dans les résidus des boues brûlées qui sont alors enfouis.

Une autre technique de valorisation des boues est celle de la méthanisation. En mettant les boues dans des conditions de température élevée, les bactéries méthanisantes se mettent alors à l'œuvre et vont naturellement produire du méthane à partir du carbone des boues. Cette technique est très attrayante car elle permet de produire du biogaz et fournit donc une source d'énergie à partir des boues. Ainsi, une unité de cogénération à partir du biogaz des boues méthanisées permet de produire :

- de la chaleur pour permettre à la méthanisation de fonctionner correctement
- de l'électricité à raison d'environ 20 kWh/hab/an. Ceci représente donc environ un tiers des besoins en électricité d'une station membranaire mais plus de la moitié des besoins d'une station classique, ce qui n'est pas négligeable.

En outre, l'État a mis en place des subventions à la méthanisation, à raison de 2 c€/kWh produit. Cette filière en est d'autant plus attractive. Malheureusement, elle présente toutefois des risques car le méthane est un gaz explosif. Au printemps 2008, une explosion a d'ailleurs eu lieu à l'usine de Valenton, heureusement sans dommages humains, mais elle rappelle la dangerosité de cette technique. Les riverains de stations d'épuration sont ainsi souvent opposés à la méthanisation et la pression qu'ils exercent sur les hommes politiques peut jouer en la défaveur du développement de cette technique. Cet état de fait est toutefois malheureux car les risques liés à la méthanisation des boues sont tout de même bien maîtrisés.

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

Leur dangerosité concerne bien plus les exploitants de station d'épuration que les riverains et cette technique productrice d'énergie renouvelable est à développer.

La méthanisation laisse toutefois encore une grande quantité de boues (environ 30% de moins) qu'il faut valoriser. Les boues sont parfois simplement envoyées en décharge lorsque leur valorisation est impossible. À l'usine de Valenton, un système de gestion des boues très complexe a été mis en place afin de laisser la possibilité de créer différents « cocktails » de boues en mélangeant les boues issues de tel ou tel bassin. Ceci permet d'obtenir des boues de qualité suffisamment bonne pour l'épandage. Par précaution, il semble toutefois prudent d'utiliser les boues de stations d'épuration comme engrais pour des plantes qui ne sont pas destinées à la consommation humaine.



Source : Hydratec

*Gazomètre associé aux digesteurs de l'usine de Valenton*

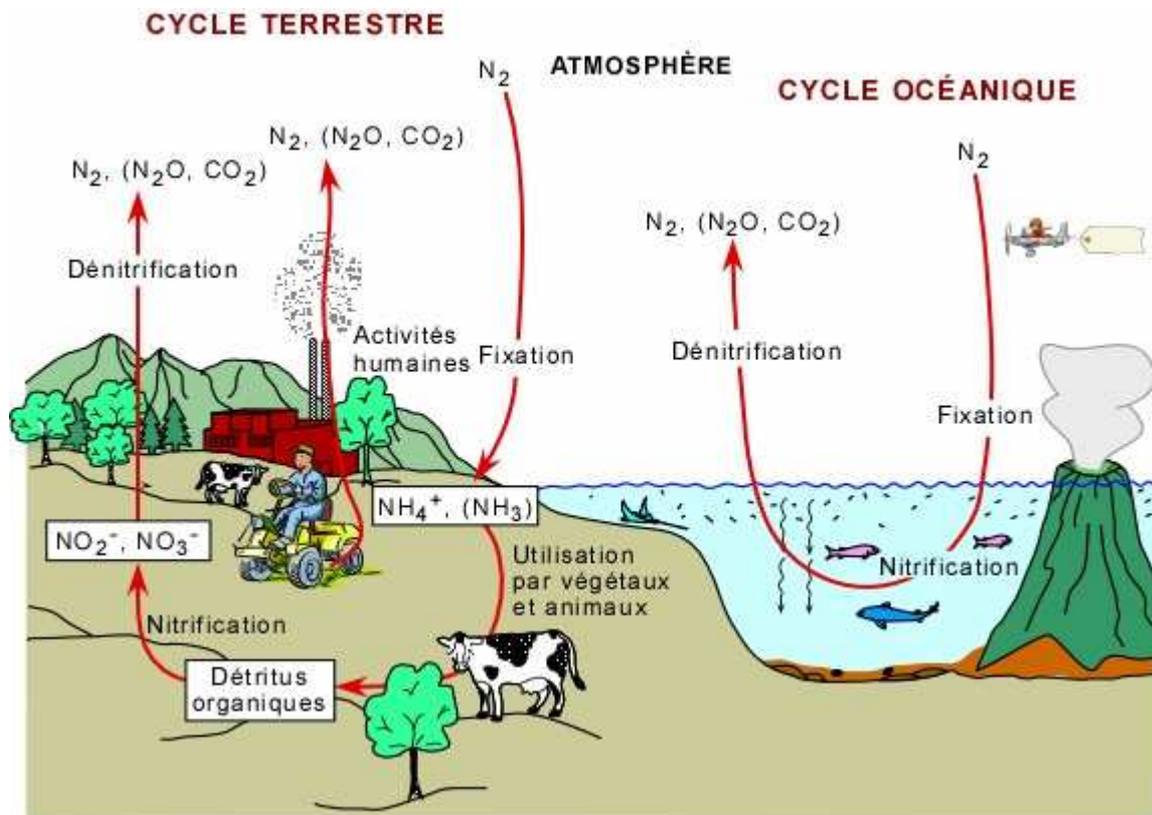
Il est donc difficile de trouver un cycle de valorisation optimal des déchets des eaux usées. Leur composition très complexe, en particulier lorsque les eaux usées domestiques sont mélangées aux eaux pluviales, rend leur valorisation délicate. Le cycle naturel d'utilisation des déchets organiques humains comme amendement agricole est délicat. Afin de comprendre comment nous pourrions retrouver un fonctionnement cyclique, voyons comment s'opère, à titre d'exemple, le cycle de l'azote dans les eaux usées.

## **2.3. L'exemple du cycle de l'azote dans l'assainissement**

### **2.3.1. Cycle de l'azote dans la nature**

Comme nous l'avons vu précédemment pour les déchets solides, une gestion correcte des déchets est atteinte lorsque ceux-ci suivent un cycle et que toutes les étapes de ce cycle sont correctement appréhendées et optimisées en termes de pollution, de consommation d'énergie, de transport, etc. Ce fonctionnement cyclique, qui prévaut souvent dans la nature, est mis en avant par une œuvre d'art à l'entrée de l'unité de nitrification de l'usine d'Achères. Le cycle de l'azote y est représenté symboliquement avec ses différentes phases. La comparaison du cycle de l'azote dans la nature et dans les systèmes d'assainissement réserve toutefois des surprises.

. La présentation du cycle de l'azote ci-dessous est issue du cours mis en ligne Planète Terre de Pierre-André Bourque de l'Université Laval au Canada. Le schéma suivant présente une simplification de ce cycle :

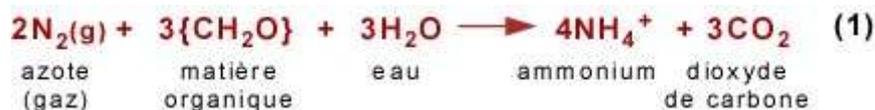


Source : Université Laval

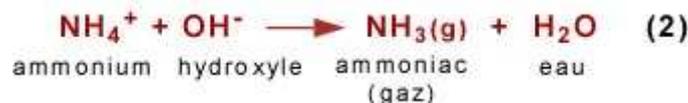
### Cycle de l'azote

Trois processus de base sont impliqués dans le recyclage de l'azote : la fixation de l'azote diatomique  $N_2$ , la nitrification et la dénitrification.

La **fixation de l'azote** correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux. Elle se fait par certaines bactéries qui vivent dans les sols ou dans l'eau et qui réussissent à assimiler l'azote diatomique  $N_2$ . Il s'agit en particulier des cyanobactéries et de certaines bactéries vivant en symbiose avec des plantes (entre autres, des légumineuses). La réaction chimique type est:



Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux:



La réaction nécessite un apport d'énergie de la photosynthèse (cyanobactéries et symbiotes de légumineuses). Cette fixation tend à produire des composés ammoniacés tels l'ammonium  $NH_4^+$  et son acide conjugué l'ammoniac  $NH_3$ . Il s'agit ici d'une réaction de réduction qui se fait par l'intermédiaire de substances organiques notées  $\{CH_2O\}$  dans l'équation 1.



nuit à leur qualité. La première imposition réglementaire a donc été de contrôler la quantité d'ammonium rejeté aux rivières. En conséquence, les stations d'épuration se sont dotées de bassins d'aérations supplémentaires qui ont permis, comme à Achères, de réaliser cette nitrification en station d'épuration et non en rivière. Cette aération, réalisée par des surpresseurs d'air, est fortement consommatrice en électricité mais permet d'éviter l'anoxie de la rivière.

### *Second traitement de l'azote*

Mais l'azote, même sous la forme nitrate, pose encore des problèmes de qualité. En effet, l'azote est un nutriment qui sert à la croissance des algues. Son rejet massif en rivière facilite donc leur croissance. Même si, dans le bassin de la Seine, les nitrates proviennent aussi en grande partie du lessivage des engrais chimiques des champs vers la rivière et que le nitrate n'est pas le réactif limitant de la croissance des algues en Seine, il finit tout de même par être déversé à la mer où il sert de nutriment pour les algues marines et entraîne une eutrophisation en Mer du Nord comme le montrent les travaux de la commission « Oslo-Paris » (OSPAR) pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est.

La réglementation a donc imposé, en plus du traitement de l'ammonium, un traitement des nitrates et la limitation de leur rejet dans les zones sensibles à l'eutrophisation. Ce traitement consiste à reproduire industriellement la dénitrification bactérienne qui a lieu naturellement dans les zones dépourvues d'oxygène des rivières. En station d'épuration, la phase d'aération pour nitrification de l'ammonium est donc complétée par une phase anoxie où les bactéries vont dénitrifier les nitrates et le transformer en diazote.

Ainsi, comme le figure l'œuvre d'art d'Achères, la boucle est bouclée et le diazote qui a été fixé dans les usines de production d'engrais est à nouveau renvoyé à l'atmosphère sous forme de diazote. Cependant, un tel cycle de l'azote est-il vraiment idéal ?

### **2.3.3. Les problèmes du cycle industriel de l'azote**

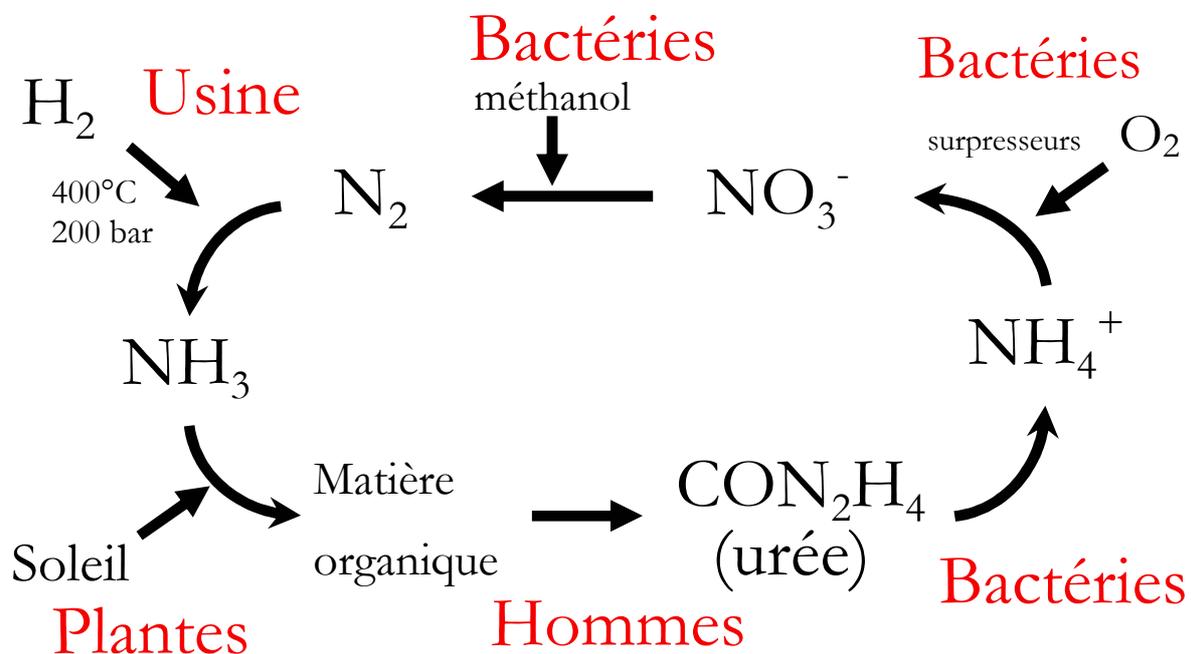
Ce cycle industriel de l'azote favorise certes la qualité de l'eau de nos rivières mais il peut aussi être jugé totalement aberrant. En effet, après avoir consommé tant d'énergie pour transformer le diazote de l'atmosphère en une forme assimilable par les plantes, l'ammonium, n'est-il pas regrettable que les stations d'épuration le retransforment en diazote au lieu de faire tourner le cycle de l'ammonium engrais- plante-homme-engrais. En effet, l'urée que nous produisons est à nouveau facilement assimilable par les plantes. Ce système était en place à l'époque où Achères était un champ d'épandage et où les eaux usées venaient directement alimenter ces champs. Mais aujourd'hui, l'azote se retrouve principalement sous forme dissoute et une grande partie n'est donc pas récupérable dans les boues de stations d'épuration.

Les coûts énergétiques de notre cycle de l'azote sont aujourd'hui immenses et méritent une révision dans une perspective de développement durable. En effet, les dépenses énergétiques se retrouvent au niveau :

- de la production d'engrais chimique car la réaction d'Haber-Bosch est très énergivore ;
- de la nitrification en station d'épuration car les aérateurs sont de forts consommateurs d'électricité ;
- de l'injection de méthanol dans les stations d'épuration.

En effet, pour réaliser la dénitrification en station d'épuration, il faut être dans des conditions anoxiques et en présence de nitrates mais aussi en présence de substrat carboné. Or, dans beaucoup de stations, lors de l'étape de dénitrification, une grande partie de la matière organique carbonée a déjà été consommée. Il faut donc ajouter du substrat carboné dans les bassins de dénitrification. Cet ajout se fait aujourd'hui usuellement par l'injection de méthanol.

L'injection de méthanol est aujourd'hui un comble du traitement des eaux usées. En effet, alors que les eaux usées regorgent de substrat carboné issu de nos excréments, on en arrive à injecter un substrat carboné supplémentaire, qui plus est sous forme de méthanol. En effet, le méthanol est généralement synthétisé par oxydation du méthane. Il s'agit donc de la transformation d'une ressource fossile. Toutefois, lorsqu'une nouvelle station d'épuration est construite, l'étape d'injection de méthanol peut être évitée ou réduite en utilisant justement le substrat carboné des excréments.



Source : Fabien Esculier

### *Cycle de l'azote en assainissement*

Ainsi, les déchets azotés des stations d'épuration suivent aujourd'hui un cycle tout aussi industriel et énergivore que la production d'engrais azotés. La réforme de ce cycle semble nécessaire dans une perspective de diminution des consommations d'énergie et de ressources fossiles. Mais pour continuer à respecter un bon niveau de qualité d'eau en rivières et éviter l'eutrophisation des rivières et de la mer par les nitrates, il ne semble pas y avoir d'autre solution facile à mettre en œuvre. Il existe cependant quelques pistes de réforme de l'assainissement qui permettront peut-être, dans le futur, d'améliorer la gestion de nos déchets liquides, pour l'azote comme pour les autres constituants.

## 2.4. Quelques pistes d'amélioration de l'assainissement

### 2.4.1. Le tri sélectif : pourquoi pas pour les eaux usées ?

L'idée la plus séduisante aujourd'hui est relativement simple et prend exemple sur la gestion actuelle des déchets solides : le traitement des déchets liquides est largement simplifié si les différents constituants sont triés à la source. Le tri à la source des déchets liquides pose toutefois les mêmes problèmes que les déchets solides : il nécessite une bonne éducation de la population, il doit être robuste pour ne pas être défaillant en cas d'erreur de tri et il multiplie les coûts de collecte en séparant les flux. Toutefois, si le pas a été franchi pour les déchets solides, pourquoi ne le serait-il pas pour les déchets liquides ? Voyons quels sont les constituants des eaux usées pour lesquels le tri sélectif semble intéressant.

### 2.4.2. La séparation des graisses

Cette possibilité de tri à la source est déjà existante mais elle est mal connue et elle fonctionne relativement mal. Sa mise en pratique serait pourtant bénéfique.

Tout d'abord, il est important de noter la différence entre 2 types de graisses : les graisses minérales et les graisses animales ou végétales. Ces graisses doivent être collectées et valorisées séparément car elles ne sont pas de même nature. Les réseaux d'égout sont concernés par les deux types de graisses car les fuites de voitures, volontaires ou non, apportent des huiles minérales au réseau d'eau pluviale ou d'eaux usées ; les habitations et les restaurants apportent des graisses alimentaires au réseau d'eaux usées. Nous nous penchons ici uniquement sur le problème des graisses alimentaires.

D'après DEFREVILLE (2007), la production moyenne de graisses s'élève à 7,3 kg de lipides par an et par Equivalent Habitant. Cela correspond à environ 600.000 tonnes de déchets graisseux produits par an en France.

Ces 600.000 tonnes de graisses sont récupérées par différents moyens :

- 150.000 tonnes sont récupérées par les dégraisseurs de STEP, lors du prétraitement des eaux usées,
- 200.000 tonnes sont récupérées par les bacs à graisse de restauration. En effet, ceux-ci sont censés être équipés depuis la loi du 13 juillet 1992. En pratique, seuls 20 à 25% de ces bacs à graisse sont effectivement collectés. Le gisement théorique est donc bien plus important.
- 100.000 tonnes sont récupérées par la vidange des séparateurs à graisse des fosses septiques. Environ 20% des fosses septiques en sont équipées.
- 150.000 tonnes sont produites et récupérées par les industries agro-alimentaires.



Source : Defréville

*Graisses collectées*



Or le transport des 150.000 tonnes de graisses en réseau qui arrivent aux stations d'épuration s'avère problématique. En effet, les graisses n'étant par nature pas miscibles avec l'eau, celles-ci ne sont pas aisément transportables. En outre, les graisses se solidifient dans le réseau ce qui peut provoquer des colmatages de tuyaux. Ainsi, à Sarcelles, où une grande partie de la population d'origine maghrébine cuisine traditionnellement avec beaucoup de graisses, les réseaux sont souvent bouchés par les graisses. Notons aussi qu'il est interdit de déverser des huiles brûlantes au réseau. En effet, ceci pourrait représenter un danger pour le personnel d'exploitation. En outre, le règlement d'assainissement de Paris (1998), stipule que les « effluents ne doivent pas être à une température supérieure à 30°C au droit du rejet ».

Source : Hydratec

### *Débordement d'égout colmaté à Sarcelles*

Il est donc souhaitable de collecter ses graisses séparément et de ne pas les évacuer par le réseau qui est inadapté. La meilleure solution consiste à ne pas les jeter et à les utiliser autant que possible. Les graisses animales, par exemple, peuvent être utilisées pour donner un bon goût de viande à des plats végétariens. Si l'on souhaite toutefois se débarrasser de graisses, il conviendrait de les amener à une déchetterie acceptant les graisses alimentaires. Cette solution est pour l'instant assez utopique car elle engendre un grand effort pour l'utilisateur. Une autre solution consiste à trouver un restaurant proche de chez soi qui accepterait qu'on ajoute des graisses dans son bac à graisses. Enfin, dans les communes où les déchets solides sont incinérés, l'évacuation des graisses par les poubelles dans un container hermétique est une bonne solution car les graisses ont un fort pouvoir calorifique et leur combustion alimentera davantageusement l'incinérateur.

En résumé, la séparation à la source des graisses nécessite une implication de la population, de même que le tri des déchets solides. La mise en place de ce tri ne pourra donc se faire que grâce à une bonne communication auprès du public et par une bonne éducation sur ce sujet. Encore une fois, l'éducation et l'information sont un des leviers essentiels de l'amélioration de notre gestion des déchets.

### **2.4.3. La séparation des eaux-vannes**

Une autre séparation à la source possible est celle des eaux-vannes, c'est-à-dire des eaux provenant des toilettes. Cette séparation est bien entendu très difficile à réaliser dans les immeubles déjà construits où la séparation des différents réseaux nécessiterait d'importants travaux. En revanche, dans les nouveaux logements ou dans les maisons individuelles, cette séparation est assez facile à mettre en œuvre et ne représente pas un surcoût très élevé. Or elle présente de grands avantages.

En effet, à condition qu'on n'y ajoute rien d'autres que nos déchets organiques et des produits d'entretien non agressifs et en quantité raisonnable, les eaux-vannes sont de composition très régulière et facilement valorisable. Leur traitement ne nécessite pas d'étape

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

de dégrillage, dessablage ou dégraissage et, si ce n'est pour leur teneur en médicaments et hormones, constituent un parfait engrais, comme le fumier de la ferme, qui contient d'ailleurs lui aussi les médicaments et hormones administrés aux animaux. Ces déchets organiques sont aussi faciles à méthaniser.



Une fois la séparation effectuée dans l'habitation, deux solutions s'offrent alors : traiter ces déchets localement ou constituer un deuxième réseau d'amenée vers une station de traitement. Dans le quartier Vauban de Freiburg, les maisons passives ([www.passivhaus.de](http://www.passivhaus.de)) ont pris le parti de traiter ces eaux localement. Les eaux-vannes sont collectées dans un réseau sous vide similaire à celui des toilettes des avions et qui consomme donc très peu d'eau.

Elles sont ensuite dirigées vers des cuves de méthanisation. Le gaz produit est utilisé dans ces mêmes maisons pour la cuisson. Un autre avantage du traitement local est qu'il minimise le risque de fuites et de déversement incontrôlé d'eaux usées au milieu naturel.

Source : Passiv Haus à Vauban – Freiburg

#### *Toilettes pour collecte séparée des eaux-vannes sous vide à Freiburg*

L'autre solution consisterait à créer un deuxième réseau d'eaux usées, le premier réseau servant alors à collecter les eaux grises (c'est-à-dire les eaux domestiques sans les eaux-vannes). Ces eaux grises sont elles aussi relativement simples à traiter car elles ont peu de matières organiques. Cependant, la pose et l'entretien d'un deuxième réseau peuvent s'avérer prohibitifs.

En effet, d'après des coûts standard de pose de canalisation, on peut estimer un surcoût d'environ un tiers lors de la pose du réseau. En effet, les coûts de creusement de tranchées sont presque similaires mais il faut acheter deux petits tuyaux au lieu d'un gros. Quant aux coûts et à la difficulté de l'entretien, c'est sûrement eux qui freinent le plus le développement de telles techniques. Le traitement des effluents est toutefois simplifié et la station d'épuration a priori moins chère.

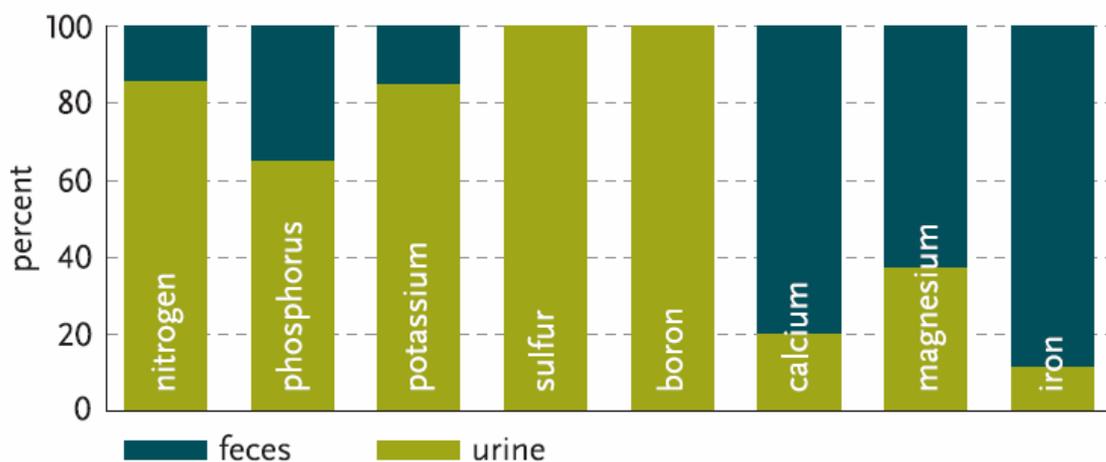
#### **2.4.4. La séparation de l'urine**

La séparation des eaux-vannes peut aller encore plus loin avec la séparation à la source de l'urine. Cette technique a été développée en Suède et elle est aussi développée et utilisée par l'établissement de recherche EAWAG en Suisse, dans le cadre du projet *NoMix*. Elle présente de nombreux avantages.

Tout d'abord, l'urine contient environ 80% de l'azote et 50% du phosphate des déchets organiques donc sa collecte sélective permet un traitement plus facile des nutriments. La

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

nitrification/dénitrification n'est alors plus nécessaire en station d'épuration ce qui résoudrait le problème du cycle de l'azote présenté en 2.3. Les phosphates sont aussi mieux collectés sélectivement. De même que l'azote, le cycle du phosphate est aussi actuellement insatisfaisant car le phosphate en agriculture provient des mines de phosphates dont les réserves sont limitées (environ 100 ans) et finit aujourd'hui dans l'océan ou dans des boues où il est difficilement récupérable.



Source : Larsen, GAIA

### *Origine des nutriments dans les eaux-vannes*

L'urine contient aussi un grand nombre de micro-polluants tels les hormones ou les médicaments et il serait donc nécessaire de les traiter. Par rapport à la situation actuelle où ces micro-polluants ne sont pas du tout traités, la collecte sélective de l'urine permettrait de les traiter plus facilement. D'après les documents du cours de M. Duguet « Traitement de l'eau » de l'ENPC, on peut observer aujourd'hui une concentration d'environ 6 µg/L de paracétamol en entrée de station d'épuration et de 10ng/L de l'anti-dépresseur Diazepam dans de l'eau jugée potable !

Ensuite, l'urine est facilement réutilisable en tant qu'engrais. La Suède impose, pour des raisons sanitaires, que l'urine soit stockée pendant 6 mois avant de pouvoir être réutilisée mais il est peut-être possible de réduire cette période. En tout cas, l'urée ainsi récupérée serait probablement compétitive par rapport à l'urée produite de façon industrielle.

En pratique, la collecte séparée de l'urine existe déjà dans la plupart des toilettes publiques pour hommes avec les urinoirs. Dans les toilettes standard, la séparation se fait tout simplement par des petits trous réalisés à l'avant des toilettes comme le montre la photo suivante.



Source : Larsen, GAIA

### *Toilettes NoMix*

Un problème reste toutefois à résoudre qui vient du transport de l'urine. En effet, l'urine cristallise facilement en struvite (phosphate de magnésium et d'ammonium) ce qui peut boucher les canalisations. On peut toutefois remédier à ce problème en installant des canalisations en matériau adéquat et avec une forte pente. Notons que l'utilisation d'eau de pluie pour tirer la chasse d'eau minimise ces problèmes de précipitation car l'eau de pluie est moins dure. Il s'agit donc d'une bonne combinaison de techniques innovantes.

La collecte séparée de l'urine pourrait donc d'ores et déjà être mise en place dans tous les lieux publics où des urinoirs sont déjà présents dans les toilettes pour hommes. Le retour d'expérience de ces installations permettrait ensuite de penser à son développement à plus grande échelle. Notons par exemple que le quartier Erdos de la ville de Dongsheng en Chine a déjà construit un complexe de 825 appartements dans lequel l'urine est collectée séparément et les excréments sont récupérés dans des toilettes sèches.

La séparation de l'urine est aussi mise en place aujourd'hui pour l'assainissement autonome rural. Le programme suédois Ecological Sanitation Research a ainsi participé à près de 200 projets à travers le monde (mappemonde interactive disponible sur leur site Internet à [www.ecosanres.org/map](http://www.ecosanres.org/map)).

À titre d'exemple, l'association indienne SCOPE (Society for Community Organisation and Peoples Education) a installé 181 toilettes avec séparation de l'urine au Tamil Nadu. Cette séparation de l'urine a de nombreuses vertus. Elle permet entre autres :

- de réutiliser directement l'urine diluée en agriculture comme fertilisant.
- de faciliter la déshydratation et l'aseptisation des fèces. Plus les fèces seront sèches et moins les animaux de type mouches ou cafards s'y développeront. Après maturation, les fèces sont aussi utilisées comme amendement organique.

Les photos ci-après donnent une idée de ce type d'installation, relativement rustique, dans des projets au Burkina Faso et au Mali.



Source : Rosemarin et al., Zero-M project

### *Toilettes avec séparation de l'urine et des fèces en milieu rural*

#### **2.4.5. Autres séparations**

La recherche d'autres séparations à la source des déchets liquides serait à mener. Elle aboutirait sûrement à long terme à un changement de nos habitudes car il paraît difficile aujourd'hui de voir comment on pourrait séparer à la source nos cheveux de l'eau de la douche ou l'amidon de l'eau des pâtes. Ces techniques auraient en tout cas le même fondement conceptuel : cesser d'utiliser l'eau comme un transporteur de déchets.

Quoi qu'il en soit, on remarque que les techniques de séparation à la source citées auparavant s'allient facilement avec des techniques de traitement local. Elles évitent alors le transport des effluents sur de longues distances et le traitement dans de grosses stations d'épuration d'un effluent de composition complexe. Elles évitent aussi les risques de débordement des réseaux par temps d'orage ce qui représente aujourd'hui le principal problème des réseaux d'assainissement.

Dans les maisons passives du quartier Vauban de Freiburg ou dans le quartier Erdos de Dongsheng, le cycle de l'eau et des déchets qui l'accompagnent est aussi décentralisé que possible. Erdos est ainsi doté d'une petite station de traitement locale qui compost les matières fécales, traite les eaux grises avant réutilisation, etc. La maintenance de ces systèmes décentralisés est toutefois plus difficile à gérer car elle se fait au niveau du groupement d'habitation. Elle aide cependant à la responsabilisation des habitants dans le traitement de leurs déchets.

## 3. Un déchet problématique : les rejets urbains de temps de pluie

---

Parmi les eaux usées, les rejets urbains de temps de pluie, déversés dans les rivières lors d'épisodes pluvieux intenses, sont particulièrement complexes à gérer. D'une part, ils dégradent fortement le milieu par des types de polluants très variés, d'autre part, leur réduction nécessite souvent des travaux coûteux de grande envergure. Une gestion circulaire de ces déchets, dans l'esprit des solutions proposées précédemment, est encore loin de pouvoir être mise en place.

Cependant, différentes techniques sont déjà utilisées en France qui permettent de gérer ces eaux autrement que par un réseau d'eaux pluviales. L'ouvrage *Techniques alternatives aux réseaux d'assainissement pluvial*, publié par le Centre d'études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU), constitue une bonne source d'information sur les différentes techniques que sont les noues, les bassins de stockage, les chaussées à structure réservoir, les toitures terrasses, etc. Dans le chapitre qui suit, nous nous concentrerons principalement sur les impacts des rejets d'eaux pluviales sur le milieu naturel.

### 3.1. Le Bon État écologique des masses d'eau

#### 3.1.1. La directive cadre européenne

Avec la mise en place de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE), la qualité de l'eau devient un enjeu politique primordial. En effet, cette Directive, transposée en 2004 dans la loi française, impose que toutes les masses d'eau aient atteint le bon état écologique d'ici 2015, avec quelques possibilités de dérogations en 2021 et 2027, en particulier pour les masses d'eau fortement anthropisées. La politique de l'eau a donc fortement changé depuis la DERU de 1991 car, au lieu d'imposer une obligation de moyens (un bon réseau, une station d'épuration correcte, etc.), la DCE impose une obligation de résultats. Il y a donc désormais une relative liberté de stratégie à adopter : c'est uniquement le résultat final qui sera jugé.

Or justement, comment juger du bon état écologique d'une masse d'eau ? La nature, en particulier en France, a été très fortement modifiée par l'homme depuis des millénaires. Un référentiel naturel théorique, qui ferait abstraction de l'impact anthropique, est impossible à mettre en œuvre. La stratégie adoptée par la DCE consiste à évaluer la qualité de l'écosystème de ces masses d'eau, en la jugeant par des critères biologiques mais aussi des critères sous-tendant la biologie.

Le principe du jugement du bon état est donné par la circulaire DCE 2005/12 du 28 juillet 2005, du ministère de l'écologie et du développement durable, relative à la définition du « bon état ». Les masses d'eau sont classées par type et à chaque type de masse d'eau est associée une masse d'eau de référence, non ou très peu impactée par l'homme. Une masse d'eau est jugée en bon état si les différents critères ne sont pas dégradés de plus de 25% par rapport à cet état de référence. D'après les différents Etats-membres, cette valeur constitue en effet une *aurea mediocritas* du bon état écologique : les milieux aquatiques sont alors dans une situation permettant le développement d'activités économiques de façon équilibrée : ils conservent de bonnes capacités d'auto-épuration et les niveaux d'efforts de dépollution

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

demandés aux activités ne sont pas disproportionnés. La figure suivante indique les risques d'écart aux objectifs de la DCE dans le bassin de la Seine.



### *Risques d'écart aux objectifs de la DCE dans le bassin de la Seine*

Cette valeur signifie aussi que l'on accepte une perte de 25% de biodiversité, sachant que ce sont les espèces les plus exigeantes qui ont disparu. Il est difficile de juger des conséquences d'une perte de 25% de biodiversité. Cet objectif est toutefois bien complémentaire de la stratégie nationale pour la biodiversité car celle-ci a pour but de stopper la perte de biodiversité d'ici 2010. La DCE impose de restaurer une bonne biodiversité dans les cours d'eau de mauvaise qualité, avec toutefois des échéances plus lointaines que 2010.

En pratique, l'état écologique des cours d'eau est mesuré par trois indices biologiques qui sont l'Indice Biologique Global Normalisé, axé sur les micro-invertébrés, l'indice Diatomées, et l'indice Poissons. En outre, des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie doivent être évalués tels l'oxygène dissous, le phosphore total, l'ammonium, etc.

### **3.1.2. Évaluation de la qualité de l'eau**

La DCE crée donc une nouvelle grille et un nouveau système d'évaluation de la qualité de l'eau des rivières. Auparavant, la première grille d'évaluation fut instaurée en 1971. Elle fut ensuite remplacée par la grille d'évaluation SEQ-Eau par une circulaire du ministre chargé de l'environnement datant du 10 juin 1999 et qui devait avoir effet à la fin 2001 au plus tard. Or en 2005, lors de la diffusion de la circulaire initiant le passage à la nouvelle grille DCE, le passage de la grille 1971 à la grille SEQ-Eau n'avait pas encore été fait. La situation est donc aujourd'hui particulièrement complexe en ce qui concerne l'évaluation de la qualité des eaux car les trois grilles coexistent.

Tous les acteurs de l'eau subissent les conséquences de cette complexité. Pour la police de l'eau, la DCE s'ajoute aux exigences des SDAGE, des SAGE et des divers arrêtés. En outre, les polices de l'eau voient aujourd'hui leur importance grandir sans que vienne nécessairement une augmentation de leur effectif et de leurs moyens. La même entité a Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

souvent les rôles de police administrative (contrôle réglementaire amont) et de police judiciaire (contrôles sur le terrain). En outre, la police de l'eau doit agir sur un grand nombre de sujets différents et il lui est donc difficile d'agir correctement dans tous les domaines.

Face aux polices de l'eau, les collectivités et les bureaux d'étude sont donc dans une situation difficile car les exigences de la police de l'eau ne sont pas toujours claires. Tout d'abord, la police de l'eau peut être exercée par des entités très différentes selon les cours d'eau : une DDE, une DDAF, un service de navigation, un service maritime, une DDASS, etc. Cette multiplicité des acteurs ne favorise pas la cohérence de leurs actions et de leurs exigences. Il n'y a pas aujourd'hui de doctrine clairement établie pour toutes les polices de l'eau. D'après M. Quéméner du Service Navigation de la Seine, il existe tout de même un « Club des polices de l'eau » qui permet d'harmoniser leurs pratiques. Malheureusement, il ne m'a pas été permis d'avoir accès aux documents qu'il produit.

Ensuite, toujours d'après M. Quéméner, le Code de l'Environnement permettrait aux polices de l'eau d'être plus contraignantes que ce que les textes législatifs exigent, si cette contrainte est justifiée. Cette marge de manœuvre des polices de l'eau est très problématique pour les collectivités et les bureaux d'études car elle ne permet pas de prévoir à l'avance les exigences de la police de l'eau et donc les moyens à mettre en œuvre. Dans un dossier « Loi sur l'eau » réalisé par le bureau Hydratec, une police de l'eau avait ainsi exigé de vérifier la compatibilité d'un projet de station d'épuration vis-à-vis des trois grilles d'évaluation de la qualité de l'eau ce qui impose de passer trois fois plus de temps sur cet aspect. La complexité de la situation législative nuit ainsi aux bureaux d'étude qui ne peuvent savoir à l'avance quelle méthodologie appliquer. En outre, les évaluations de qualité de l'eau nécessitent de faire un grand nombre de mesures et il est difficile d'une part de savoir à qui il incombe de réaliser ces mesures, d'autre part de savoir quelles sont les mesures pertinentes à effectuer car leur coût élevé limite les possibilités de mesures.

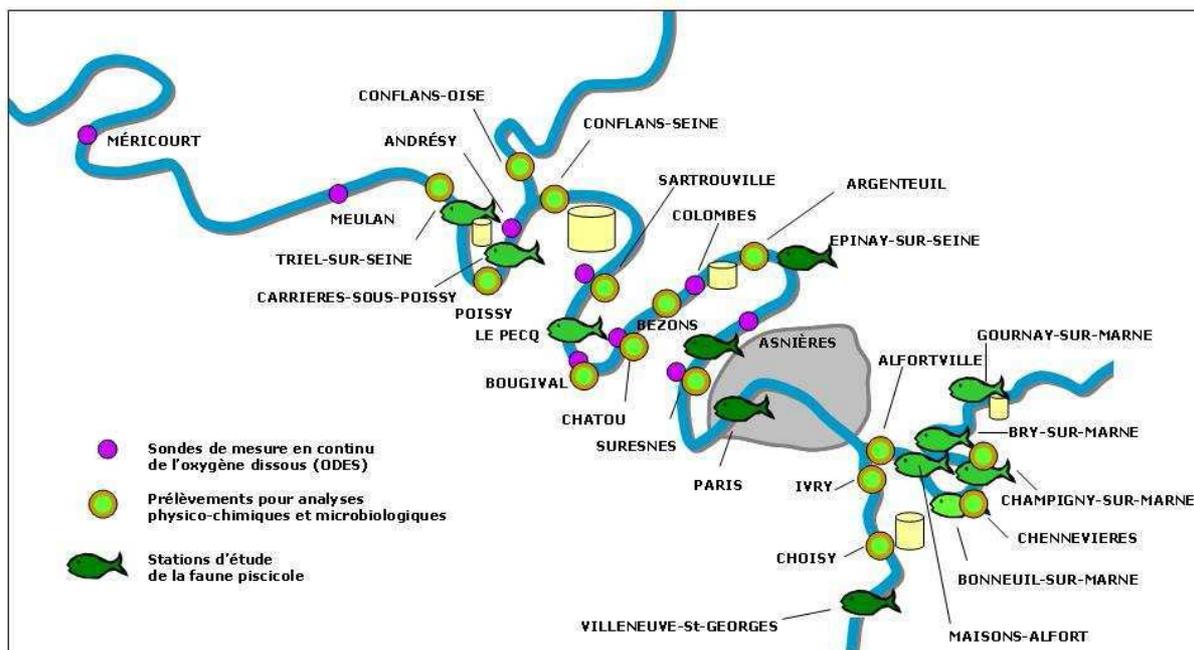
Cet exemple n'est qu'une illustration d'un problème beaucoup plus vaste. Le rapport d'information de la sénatrice Mme Fabienne Keller n°352 de 2006-2007 sur la politique de l'eau, intitulé « La France au milieu du gué », fait d'ailleurs état d'un grand nombre de changements à apporter en France dans la politique de l'eau. Beaucoup de changements sont aujourd'hui en train d'intervenir suite à la nouvelle loi sur l'eau de décembre 2006. Toutefois, la situation générale de la politique de l'eau en France, et le problème des polices de l'eau en particulier, n'a pas encore trouvé de nouvel équilibre. Dans le domaine des eaux usées, les difficultés d'application de la directive DERU illustrent d'ailleurs bien les dysfonctionnements de la politique de l'eau en France.

Suite à une mauvaise identification des zones sensibles à l'eutrophisation, la France a fait l'objet d'un arrêt en manquement de la Cour de Justice des Communautés en 2004. Rappelons que la DERU date de 1991 et que son application était prévue pour 1998. Or les enjeux du contentieux sont très importants car la France encourt une sanction pécuniaire estimée à plusieurs centaines de millions d'euros. La France essaye donc aujourd'hui de rattraper son retard. C'est ainsi que le guide de définitions pour l'application de la DERU, publié par le ministère en charge de l'environnement, est sorti en mai 2008, soit 10 ans après la date à laquelle la directive aurait déjà dû être appliquée ! Dans ce contexte, on conçoit que l'application des directives soit aujourd'hui source de fortes tensions mais on peut aussi s'interroger sur les capacités qu'aura la France à respecter la DCE vu le retard déjà pris sur la DERU.

L'exemple des déboires vécus par la France pour l'application de la DERU illustre en tout cas la force de l'Union Européenne et sa capacité à imposer aux États une bonne conduite. L'arrêt de la Cour Européenne a eu pour conséquence de dynamiser et de remettre en cause la gestion française de l'eau. L'Union Européenne amène dans ce cas la France à adopter un comportement vertueux et ce rôle de l'Union Européenne est salutaire pour la France. Dans le cas de la DERU, il est toutefois étonnant de constater que la France encoure de si grandes peines alors que, selon M. Tassin, d'autres États comme l'Italie n'ont pas eu d'arrêt de la Cour mais présentent des lacunes qui pourraient justifier un arrêt similaire.

### 3.1.3. L'atteinte du Bon État écologique pour la Seine à Paris

L'atteinte du bon état écologique figure toutefois déjà dans les objectifs de la politique de l'eau en France. Une consultation du public à ce sujet est d'ailleurs actuellement en cours jusqu'au 15 octobre 2008. Pour la Seine au niveau de la région parisienne, le bon état écologique n'est pas encore atteint mais des efforts portés sur les rejets d'assainissement devraient améliorer cette situation. Le bilan 2007 de la qualité de la Seine et de la Marne effectué par le SIAAP montre que la conformité de la Seine vis-à-vis de la directive cadre en 2007 est même atteinte en amont de Paris. La figure suivante, issue de ce rapport, montre la localisation des points de mesure du SIAAP sur la Seine et la Marne. Cette figure sert aussi à repérer la localisation des différentes villes mentionnées dans ce rapport.



Source : SIAAP

*Points de surveillance du SIAAP*

La conformité de la Seine vis-à-vis de la directive cadre a été étudiée au niveau de Paris (Choisy, Suresnes), légèrement en aval (Sartrouville), après la station d'épuration de Colombes mais avant celle d'Achères, et très en aval de Paris (Poissy, Meulan), après la station d'épuration d'Achères. Pour l'évaluation de l'état, la méthode utilisée est celle du percentile 90, c'est-à-dire la valeur dont 90% des mesures sont inférieures. En effet, la méthode des moyennes est moins pertinente car les organismes biologiques sont affectés par une concentration maximale, même si son occurrence est faible. Les résultats sont figurés dans le tableau suivant.

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

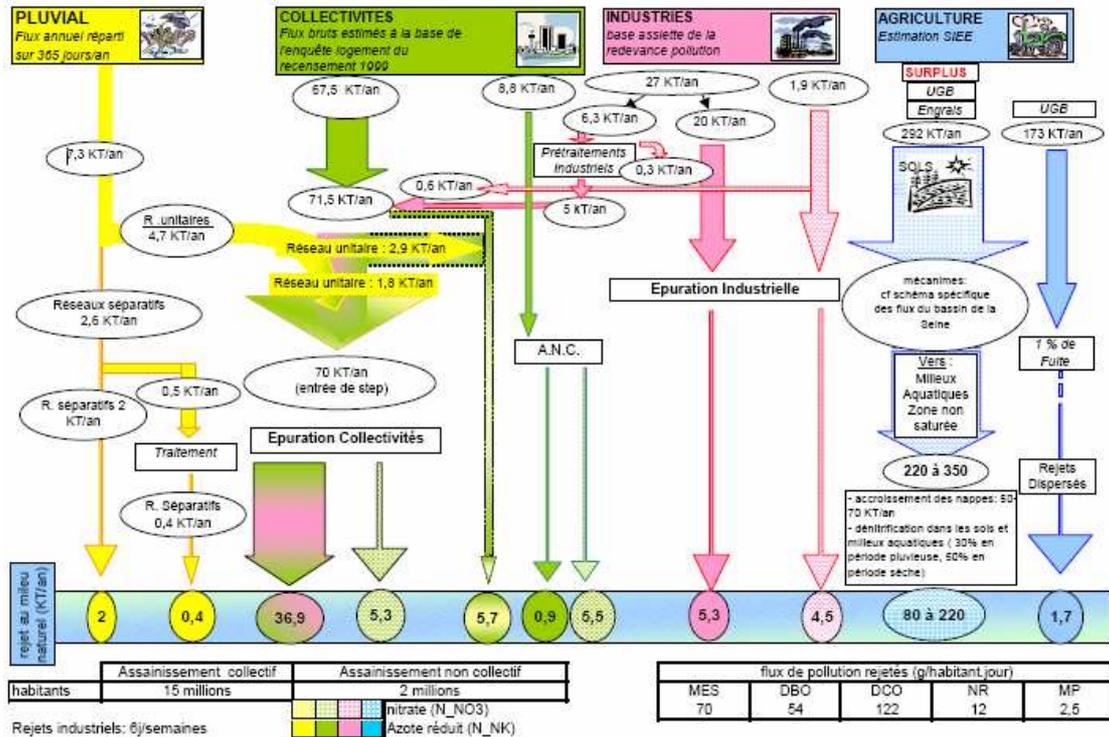
CONFORMITE VIS-A-VIS DE LA DIRECTIVE CADRE EN 2007							RAPPEL 2006			
Paramètres	Limites supérieures et inférieures du "bon état"	Amont (Suresnes ou Choisy)		Moyen (Sartrouville)		Aval (Meulan ou Poissy)		Amont (Suresnes ou Choisy)	Moyen (Sartrouville)	Aval (Meulan ou Poissy)
		Percentile 90%	Conformité	Percentile 90%	Conformité	Percentile 90%	Conformité			
Oxygène dissous (mg O <sub>2</sub> / L)	]8 - 6]	7,2 mg/l		6,5 mg/l		6,8 mg/l				
Taux de saturation en O <sub>2</sub> dissous (%)	]90 - 70] et ]110 - 130]	83%		74%		77%				
MES (mg / L)	]25 - 50]	32 mg/l		48 mg/l		72 mg/l				
DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> / L)	]3 - 6]	2,2 mg/l		2,5 mg/l		3 mg/l				
DCO (mg O <sub>2</sub> / L)	]20 - 30]	16 mg/l		19 mg/l		26 mg/l				
NTK (mg N / L)	]1 - 2]	1 mg/l		1 mg/l		2,1 mg/l				
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> / L)	]0,1 - 0,5]	0,13 mg/l		0,33 mg/l		1,6 mg/l				
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> / L)	]0,1 - 0,3]	0,13 mg/l		0,24 mg/l		0,61 mg/l				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / L)	]10 - 50]	26,2 mg/l		25,9 mg/l		28 mg/l				
Phosphore total (mg P / L)	]0,05 - 0,2]	0,11 mg/l		0,21 mg/l		0,27 mg/l				
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> / L)	]0,1 - 0,5]	0,27 mg/l		0,42 mg/l		0,57 mg/l				
pH minimum et pH maximum	]6,5 - 6] et ]8,2 - 9]	8,15		8,15		8,20				
Chlorophylle a + phéocpigments (µg / L)	]10 - 60]	3 µg/l		1 µg/l		4 µg/l				
Conductivité	A préciser par groupes de types									
Chlorures	A préciser par groupes de types									
<b>Paramètres physico-chimiques sous-tendant la biologie</b>		<b>Conforme en 2007</b>		<b>Non-conforme en 2007</b>		<b>Non-conforme en 2007</b>		<b>Conforme en 2006</b>	<b>Non-conforme en 2006</b>	<b>Non-conforme en 2006</b>

Conforme
  Non-conforme

Source : SIAAP

### *Conformité de la Seine au Bon État écologique*

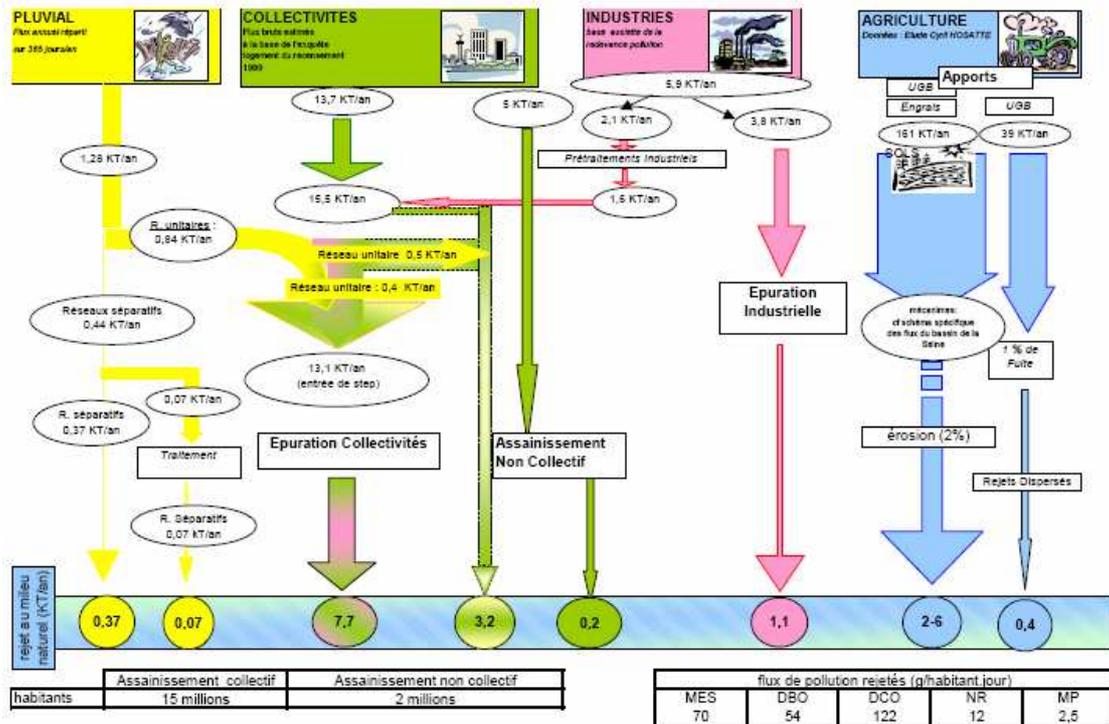
On constate que, pour les paramètres physico-chimiques sous-tendant la biologie, les principaux obstacles à l'obtention du Bon État résident dans les concentrations en composés phosphorés, en composés azotés, en matières en suspension et en oxygène dissous. Les matières en suspension tiennent une place à part dans ce résultat et proviennent majoritairement de l'érosion des sols. Nous ne nous y intéresserons pas ici. Pour les autres paramètres, les rejets issus des infrastructures d'assainissement jouent un rôle non négligeable dans ce résultat. Comme nous l'avons vu au 2.2.2, d'autres rejets de pollution, souvent diffus, entrent en jeu dans la qualité de l'eau de la Seine. Ainsi, d'après l'état des lieux du bassin hydrologique de la Seine publié en décembre 2004 par le ministère en charge de l'écologie, la répartition des rejets d'azote est la suivante.



Source : État des lieux du bassin de la Seine, 2004

### Flux globaux d'azote sur le bassin de la Seine

On y voit clairement l'impact de l'agriculture pour les rejets de nitrates. En revanche, pour les rejets d'azote réduit, l'impact des collectivités domine. Pour les rejets phosphorés, les principaux rejets semblent venir des collectivités mais des incertitudes pèsent encore sur les quantités d'éléments phosphorés issus de l'agriculture. Le schéma de répartition est donné ci-après.



Source : État des lieux du bassin de la Seine, 2004

### Flux globaux de phosphore sur le bassin de la Seine

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

## **3.2. Les rejets de l'assainissement dans la région parisienne**

Nous nous concentrerons ici sur les rejets issus des infrastructures d'assainissement de la zone centrale d'Île-de-France. Deux phénomènes entrent alors en jeu : d'une part les rejets permanents provenant des stations d'épuration et des points de déversement permanents de temps sec, d'autre part les rejets ponctuels de temps de pluie.

Dans le cadre de l'étude d'actualisation du schéma d'assainissement de la zone centrale de la région Ile De France, le SIAAP a fait réaliser en 2004 par PROLOG Ingénierie un état des lieux des déversements au milieu naturel. Ce rapport permet de prendre conscience de l'ampleur des déversements et de la difficulté de les maîtriser correctement. En effet, dans Paris et la petite couronne, un recensement non exhaustif a totalisé 211 points de rejet, gérés par 4 entités : le SIAAP et les départements de Paris et de la petite couronne. L'autosurveillance de ces points de rejet s'est nettement améliorée ces dernières années, passant de 40 points en 1998 à 155 en 2003.

### **3.2.1. Les rejets permanents dans la Seine**

Les points de déversements permanents sont relativement faciles à cerner. La DERU impose de supprimer tous les déversements de temps secs donc cette suppression devrait avoir lieu prochainement. En 1995, on totalisait 73 points de rejet permanent. Parmi ceux-ci, 10 points correspondent à des rejets épurés, 27 points ont été supprimés par création d'un nouveau réseau de collecte EU ou mise en place de prise de temps sec entre 1995 et 2004 et 12 points ne drainent que des eaux claires selon les gestionnaires. Les 24 autres points drainent des secteurs en mauvais séparatif.

L'amélioration des mauvais branchements représente un travail long et fastidieux car il est difficile de corriger de mauvais branchements. La région parisienne compte aussi un grand nombre de rivières canalisées transformées en égout, telle la Bièvre, et il est aussi très difficile de supprimer les rejets d'eaux usées dans ces rivières. Une des pratiques consiste à envoyer, en temps sec, ces rivières vers les stations d'épurations. Même si cette solution n'est évidemment pas la meilleure, elle permet au moins d'éviter le rejet direct d'eaux usées dans la Seine en attendant que tous les rejets indésirables soient supprimés.

Les déversements d'eaux usées de temps sec dans la Seine devraient donc encore continuer à diminuer. Ce travail n'est toutefois pas terminé. En avril 2008, par temps sec, la jolie promenade sur les berges nouvellement aménagées entre La Briche et Epinay permettait malheureusement de voir des excréments flotter à la surface de la Seine à la sortie du collecteur Enghien-Epinay...

Concernant les rejets de stations d'épuration, leur qualité dépend essentiellement du traitement réalisé sur la station. Les travaux réalisés, en cours ou projetés sur les stations d'épuration de la région parisienne vont amener les différentes stations à un traitement très poussé, souvent à la pointe des technologies actuelles du traitement des eaux usées, pour des budgets faramineux. Au printemps 2008, le SIAAP a signé différents contrats pour un total d'environ un milliard d'euros de travaux pour ses stations d'épurations ! On peut donc considérer qu'aujourd'hui, les efforts portés sur le traitement en stations d'épuration sont grands et les possibilités d'amélioration de ce côté-ci sont faibles. Comme mentionné au 2.2.2, le problème des stations d'épuration réside plus aujourd'hui dans leur capacité à gérer les boues que dans celle de rejeter une eau correctement épurée. La focalisation sur la qualité

de l'eau de la Seine ne favorise pas nécessairement l'utilisation de techniques alternatives qui pourraient peut-être gérer plus correctement le cycle des différents déchets des eaux usées.

Enfin, les débits rejetés en période de chômage du réseau représentent globalement un tiers des rejets de temps sec sur l'année mais sont logiquement très faibles en période d'étiage, lorsque la Seine est la plus vulnérable, puisque les déversements pour travaux sont interdits. Les quelques rejets de temps sec en période de chômage et d'étiage correspondent essentiellement à des rejets d'eaux claires pendant des périodes de configuration particulière du réseau.

En définitive, les rejets permanents dans la Seine sont relativement bien connus et les voies d'amélioration, même si elles sont parfois difficiles, sont assez bien cernées. En revanche, les déversements de temps de pluie sont encore mal maîtrisés et ils représentent une pollution importante de la Seine.

### **3.2.2. Les déversements de temps de pluie dans la Seine**

Les déversements par temps de pluie dans la Seine sont particulièrement délicats à traiter. D'une part, Paris et sa proche banlieue sont majoritairement dotés d'un réseau unitaire. Ainsi, lors d'événements pluvieux, les déversoirs d'orages rejettent à la Seine un mélange d'eau pluviale et d'eaux usées fortement chargées en pollution, ce qui ne serait pas le cas si le réseau était séparatif. La construction d'un deuxième réseau pour les eaux pluviales est très difficilement envisageable aujourd'hui car tout le réseau serait à reprendre. Toutefois, lorsqu'on pense aux travaux réalisés par Belgrand et Haussman au XIX<sup>ème</sup> siècle, des travaux d'une telle ampleur seront peut-être à nouveau réalisés dans Paris et permettraient alors de faire passer Paris en réseau séparatif.

La politique adoptée aujourd'hui consiste à stocker ces eaux pluviales et à les traiter par la suite, soit dans des stations de dépollution des eaux pluviales, soit dans les stations d'épuration existantes. L'objectif est de ne rejeter des eaux pluviales au milieu naturel que pour des pluies de période de retour supérieure à 6 mois ce qui limiterait en moyenne à 2 le nombre de rejets en Seine dans l'année. Cet objectif impose de réaliser des travaux pharaoniques. Ainsi, entre Ivry et Masséna, le TIMA (Tunnel Ivry Masséna) mesure 2,6 km de long pour un diamètre de 6,8 m. Il permet ainsi de stocker 80.000 m<sup>3</sup>, acheminés après la pluie petit à petit vers la station d'épuration de Valenton par pompage.

Ce paradigme demande un arbitrage délicat. Par nature, ces ouvrages sont destinés à fonctionner à des fréquences faibles mais ils représentent un coût exorbitant. On trouve bien sûr un optimum entre le coût des travaux à réaliser et la protection apportée mais le contraste reste tout de même choquant. Le développement d'autres solutions est freiné par l'ensemble des infrastructures déjà existantes et la grande difficulté d'une refonte complète de ce système. La gestion cyclique des déchets issus des eaux pluviales, mentionnée au deuxième chapitre de ce rapport, reste aujourd'hui très difficile à mettre en place, plus encore lorsque le réseau est unitaire comme à Paris. Face à cette situation, il convient au moins de se doter d'outils permettant de gérer au mieux cette complexité et minimiser les déversements au milieu naturel. C'est ce qu'a fait le SIAAP avec l'outil MAGES : Modèle d'Aide à la Gestion des Effluents du SIAAP.

### **3.3. Optimisation des rejets de temps de pluie**

#### **3.3.1. L'outil MAGES**

Le système MAGES (Modèle d'Aide à la Gestion des Effluents du SIAAP) est un outil informatique qui permet la gestion dynamique des réseaux d'assainissement de l'agglomération parisienne. Ce dispositif a été réalisé grâce à la coordination de trois entreprises, Suez Environnement, SATELEC et Hydratec. Il est en cours de réception depuis le printemps 2007. Les objectifs majeurs de ce projet sont la limitation du volume des rejets au milieu naturel et des inondations locales par temps de pluie, suivant le fil conducteur du schéma directeur de la Zone Centrale. MAGES ne remplace pas la gestion communale ou départementale des eaux usées mais constitue un puissant outil d'aide à la décision.

Le système MAGES recueille 24h/24 un certain nombre d'informations (débit de l'eau, état du réseau, fonctionnement des usines...) en provenance des différents acteurs de l'assainissement (communes, syndicats de communes et conseils généraux) tout en intégrant les prévisions de Météo France et permet un échange permanent de données entre la salle de contrôle et les ouvrages. L'outil a été conçu pour apporter une vision globale synthétique de l'état présent et fournir à tous les intervenants une vue exhaustive et cohérente du système. Il donne un certain nombre de précisions sur l'état du système comme les remplissages, les pompages, etc.

Une autre fonctionnalité essentielle du modèle est d'établir une prévision de la situation tendancielle, à partir de l'état pluviométrique, des situations de déversement et des inondations, prenant en compte la gestion particulière de chaque exploitant. La météorologie joue en effet un rôle particulièrement important dans cette prévision de l'évolution.

Le système MAGES propose aussi une aide à la décision car il est capable de construire un scénario de gestion optimale à partir des objectifs prédéfinis et en tenant compte des incertitudes météorologiques et des contraintes établies. Il possède également une capacité d'anticipation grâce à un modèle mathématique capable de s'adapter aux situations occasionnées par le niveau de précipitations. En situation de crise, MAGES est à même d'établir en 15 minutes des scénarios permettant d'optimiser la gestion du réseau (dysfonctionnement d'un équipement, intempéries, etc.).

Or, à ce jour, MAGES ne possède pas de module qualité. Puisqu'il permet de suivre avec précision les volumes rejetés au milieu naturel, il serait intéressant qu'il puisse aussi fournir une information sur la dégradation de la qualité de l'eau de la Seine consécutive à ces déversements. Cette information pourrait servir à réaliser le bilan de l'impact d'une pluie, prévenir plus finement la gravité des déversements et éventuellement inclure dans les choix de scénarios proposés par MAGES l'impact qualité des déversements. Pour ce faire, deux problèmes sont à résoudre :

1. évaluer le flux polluant attaché à un débit de déversement,
2. évaluer l'impact d'un déversement sur la qualité de la Seine.

#### **3.3.2. Évaluation du flux polluant attaché à un déversement**

Dans la région parisienne, l'évaluation du flux polluant attaché à un déversement de temps de pluie est particulièrement délicate. Comme l'indique Assem Kanso dans sa thèse, la complexité de la modélisation des rejets urbains de temps de pluie a trois origines : des  
Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

données rares, des objectifs multiples et une connaissance limitée des processus. Un grand nombre de travaux ont déjà été réalisés afin d'obtenir des valeurs moyennes de flux polluants rejetés mais toutes les campagnes montrent une grande variabilité des flux polluants. Le tableau ci-dessous, issu du rapport PROLOG précédemment mentionné, montre les extrema des concentrations en polluants sur trois déversoirs des Hauts-de-Seine.

Déversoir	Paramètre	Moyenne	Min-Max	
<b>DO Paul Doumer 2 Courbevoie</b>	MES (mg/l)	290	171-1194	
	Réseau unitaire	DCO (mg/l)	390	137-1494
	Exutoire Seine	N-NH4 (mgN/l)	4.7	1.6-29.4
<b>DO Seuil IV Issy</b>	MES (mg/l)	260	99-1143	
	Réseau unitaire	DCO (mg/l)	210	109-858
	Exutoire Seine	N-NH4 (mgN/l)	2.9	1-4.6
<b>DO Lebrun Antony</b>	MES (mg/l)	360	173-1083	
	Réseau mixte	DCO (mg/l)	245	65-647
	Exutoire collecteur doublement Blagis	N-NH4 (mgN/l)	3.1	1-7.6

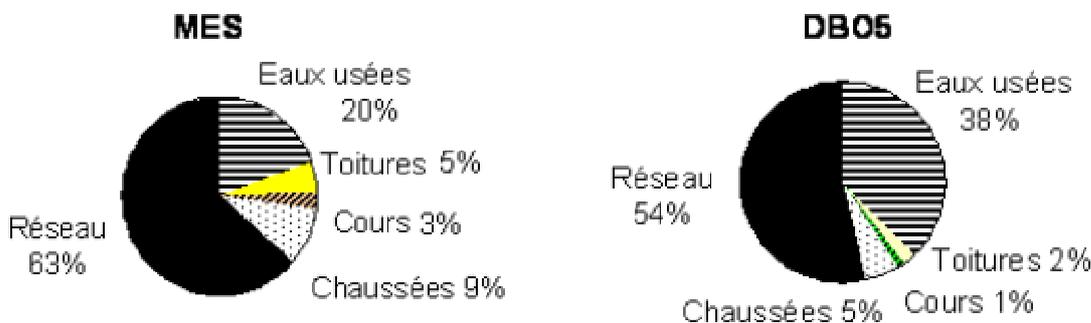
Source : SIAAP, Etat des lieux des déversements au milieu naturel

*Concentrations en polluants mesurées sur 3 déversoirs des Hauts-de-Seine (temps de pluie)*

On voit clairement que la variabilité des concentrations de polluants rejetés est très grande. Le programme OPUR, Observatoire des Polluants URbains à Paris, mené par le Centre d'Enseignement et de Recherche Eau Ville Environnement (CEREVE) entre 1994 et 2000, a permis d'éclaircir la provenance des polluants des rejets urbains de temps de pluie et d'expliquer cette variabilité dans le quartier du Marais à Paris.

*A. Origine des polluants*

Le calcul du bilan des masses entrant et sortant du réseau d'assainissement du Marais au cours d'une pluie suggère que l'érosion des stocks de pollution constitués dans le réseau constitue la principale source de matières en suspension et de matière organique par temps de pluie. Les particules érodées dans le réseau sont fortement organiques, biodégradables, assez peu chargées en métaux et relativement décantables. Elles s'accumulent par temps sec dans le réseau et sont mobilisées progressivement au cours de l'événement pluvieux, proportionnellement à l'énergie de l'écoulement. Pour les paramètres MES et DBO<sub>5</sub><sup>5</sup>, les graphiques suivants indiquent la proportion de polluants provenant du réseau.

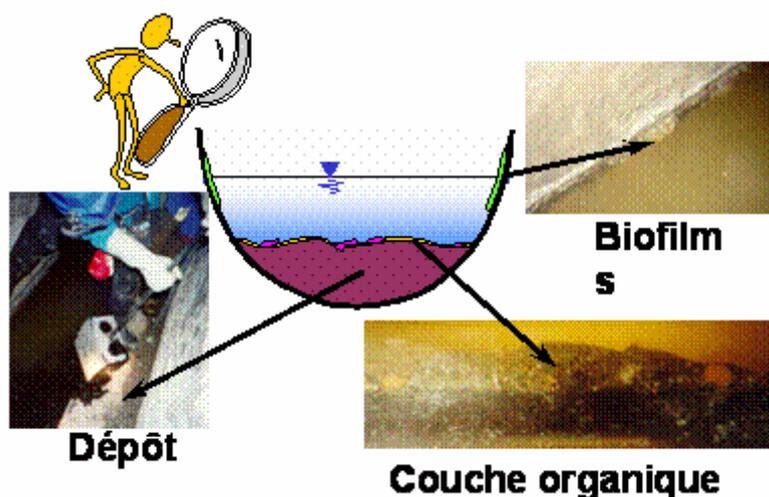


Source : OPUR

*Origine des pollutions en MES et DBO5 à l'exutoire du quartier du Marais*

<sup>5</sup> DBO<sub>5</sub> : Demande Biologique en Oxygène à 5 jours. C'est une mesure indirecte de la quantité de matière organique.

Avant l'arrivée d'une pluie, les dépôts dans les égouts ont la structure suivante :



Source : OPUR

### *Dépôts dans les égouts du quartier du Marais*

Il y a donc dans le fond du collecteur des dépôts grossiers, principalement minéraux, au-dessus desquels se dépose une couche organique. Enfin, sur les bords du collecteur apparaît un biofilm très riche en métaux. Une des conclusions des travaux du programme OPUR indique que la couche organique est la principale source de pollution du réseau du Marais contribuant à la pollution des rejets urbains de temps de pluie. Cette couche de quelques centimètres, immobile et mobilisable en surface des dépôts grossiers minéraux est composée de matière organique et de fibres. Elle se localise en des points où le taux de cisaillement est inférieur à  $0,1 \text{ N/m}^2$  et elle peut être entraînée par de faibles pluies. En outre, les particules de cette couche sont fortement chargées en polluants.

Ces résultats suggèrent qu'un des moyens permettant de diminuer la pollution rejetée par temps de pluie serait de garder les égouts propres ! En effet, en l'absence de dépôt dans les réseaux, ces polluants ne seraient pas charriés par la pluie. Un curage des réseaux est certes effectué par les services d'assainissement mais une augmentation de la fréquence de ceux-ci, voire un couplage de ceux-ci avec les prévisions météorologiques, permettrait peut-être de diminuer les stocks mobilisés par la pluie. En outre, les méthodes de curage seraient peut-être aussi à revoir car le curage des réseaux, tel qu'il est présenté au Musée des Égouts de Paris, sert à curer totalement un égout. Or, dans une optique de diminution de la pollution rejetée par temps de pluie, il serait peut-être opportun de faire un curage plus rapide pour ne nettoyer que la couche organique située au-dessus du dépôt minéral. De tels nettoyages pourraient être effectués à l'étiage, lorsque le milieu récepteur est le plus fragile. Cette piste n'a pas été étudiée spécifiquement mais mériterait sûrement un développement plus ample et précis.

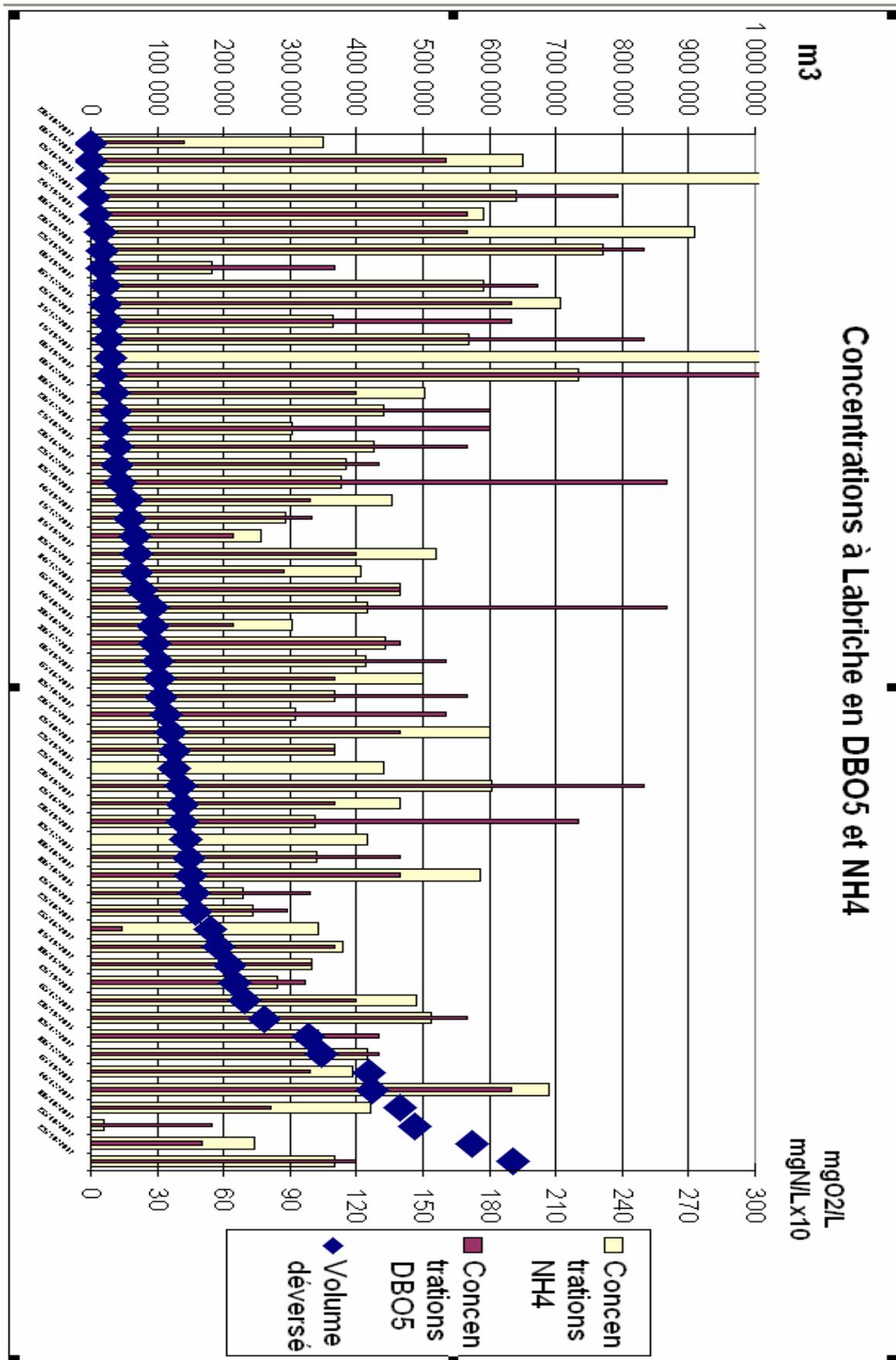
### *B. Variabilité des concentrations en fonction des débits rejetés*

L'estimation des flux polluants attachés à un déversement de temps de pluie est délicate à réaliser pour plusieurs raisons : l'imprévisibilité des pluies, l'hétérogénéité des flux déversés, le bon déclenchement des appareils de mesure. Si la plupart des flux polluants sont

estimés par des campagnes de mesure ponctuelles, qui servent à déterminer une moyenne utilisée par la suite pour les estimations de flux déversés au milieu naturel, le SIAAP a récemment mis en place des appareils de mesure à demeure aux usines de Clichy et La Briche. Ces appareils permettent donc de réaliser un véritable suivi des déversements en ces deux points.

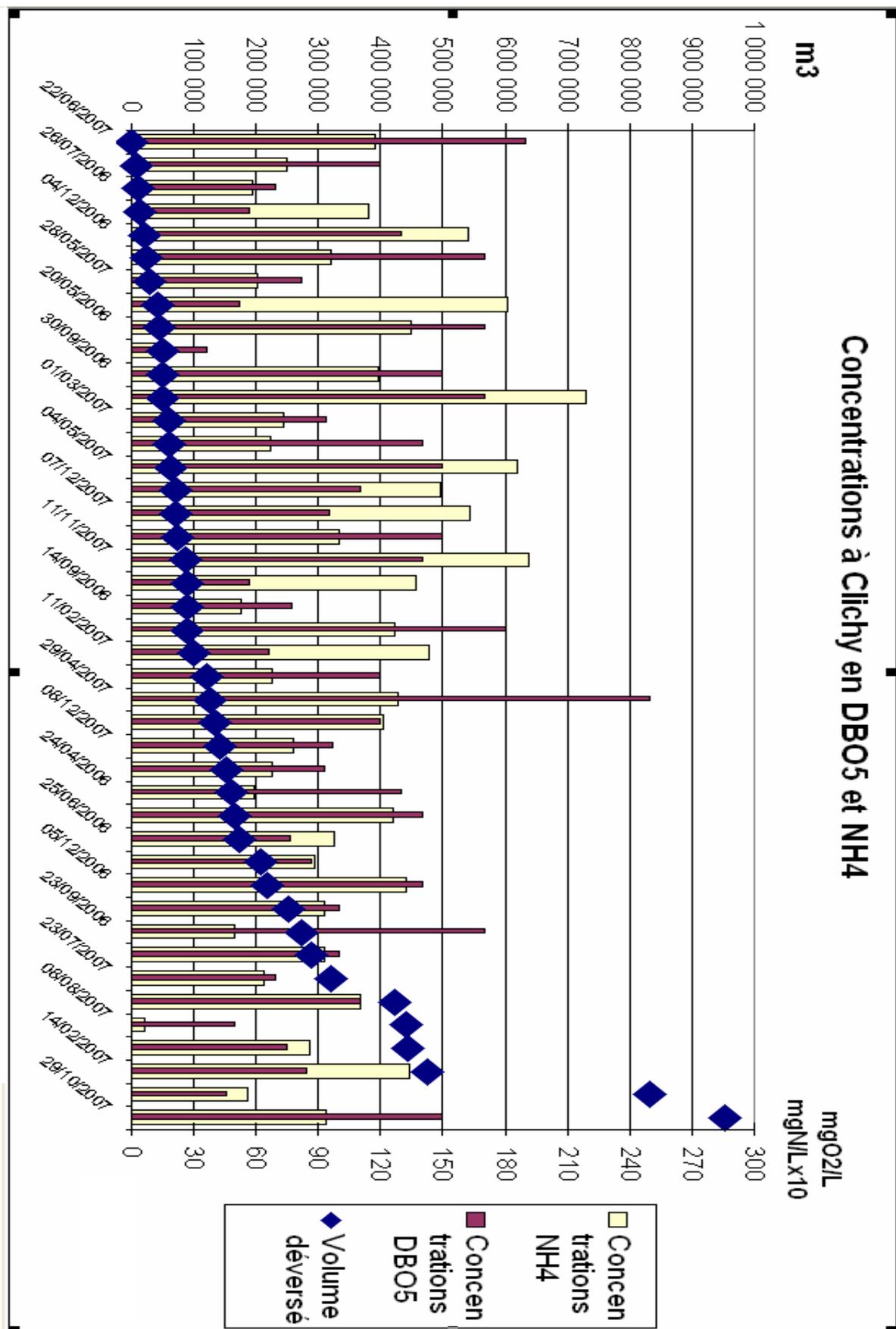
À l'usine de La Briche, il s'agit d'un préleveur asservi à une sonde détectant un déversement dans la Seine. Le préleveur est situé à l'aval de la lame déversante et, à partir du moment où un déversement est détecté, prélève toutes les 10 minutes un échantillon d'eau. L'échantillon final est ensuite transporté dans un laboratoire du SIAAP à des fins d'analyse. Il y a certes un certain nombre de biais à cette mesure (la position du préleveur après le déversement, la représentativité des échantillons d'eau prélevés, le temps d'attente de l'échantillon final avant analyse, etc.) mais ceux-ci ne devraient pas introduire de biais trop grands. En revanche, il est regrettable que ce préleveur ne fonctionne environ qu'une fois sur deux. Lors de mon passage à La Briche, le préleveur avait été débranché pour brancher un autre appareil...

Les tableaux suivants indiquent les concentrations en  $\text{NH}_4$  et en  $\text{DBO}_5$  des déversements pour lesquels des mesures ont été réalisées, sur les sites de Clichy et La Briche en 2006 et 2007. Les données de concentrations proviennent de la Direction de la Recherche et du Développement (DRD) du SIAAP ainsi que les données de volumes déversés. Les déversements ont été classés par volume croissant afin de visualiser une éventuelle relation entre la concentration du déversement et le débit déversé.



Source : Données SIAAP, graphique Fabien Esculier

Concentrations des déversements de La Briche en DBO<sub>5</sub> et NH<sub>4</sub> (2006-2007)



Source : Données SIAAP, graphique Fabien Esculier

Concentrations des déversements de Clichy en DBO<sub>5</sub> et NH<sub>4</sub> (2006-2007)

L'étude de ces données ne montre malheureusement aucune corrélation nette entre le volume déversé et les concentrations en  $\text{NH}_4$  et  $\text{DBO}_5$ . En outre, l'écart-type des données est élevé : ainsi pour les déversements à La Briche en 2007, la moyenne de la  $\text{DBO}_5$  rejetée est de 140  $\text{mgO}_2/\text{L}$  et l'écart-type de 68  $\text{mgO}_2/\text{L}$ . Les concentrations sont donc assez dispersées. Aucune loi ne se dégage nettement et le choix d'une valeur moyenne de concentration polluante, pour évaluer l'impact d'un déversement donné, peut facilement introduire un biais d'un ordre 2. L'étude des flux, et non des concentrations, ne donne pas non plus de résultat probant. En revanche, pour les estimations annuelles des flux polluants déversés, cette variabilité est moins problématique.

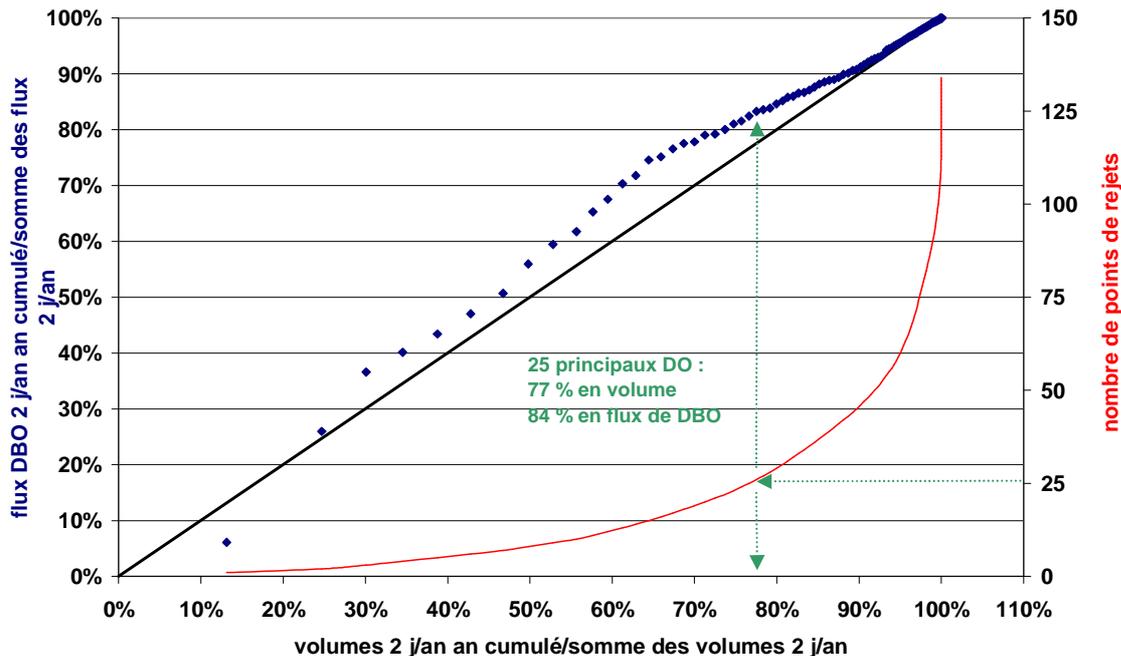
On pourrait peut-être avoir de meilleurs résultats en essayant de corréler les concentrations ou les flux de polluants à l'intensité des pluies et non au débit déversé en s'appuyant sur l'idée que la quantité de pollution arrachée est fonction de l'intensité de la pluie. Toutefois, la thèse d'Assem Kanso laisse peu d'espoir quant à la possibilité d'aboutir à une quelconque corrélation.

En effet, en évaluant différents modèles de calcul des flux polluants, Assem Kanso arrive à la conclusion qu'ils ont un faible pouvoir prédictif. L'écart-type des résidus entre les réponses des modèles et les réponses observées est élevée par rapport à l'écart-type des concentrations mesurées : les modèles disponibles aujourd'hui sont donc assez faibles à prédire la pollution attachée à un déversement.

En conséquence, certains travaux tels la thèse de Céline Lacour, actuellement en cours au CERREVE, explorent la piste des mesures en ligne. Celles-ci semblent être la seule solution permettant d'obtenir un résultat fiable. Le travail de Céline Lacour repose sur les informations que l'on peut tirer des mesures de turbidité. Il y aurait alors un seul appareil de mesure à installer (un turbidimètre). Si les corrélations entre la turbidité et les pollutions en MES,  $\text{DBO}_5$ , etc. sont probantes, cette mesure en ligne permettrait d'évaluer les flux polluants attachés à un déversement. Une autre piste, plébiscitée par le SIAAP, est celle de la mesure en ligne de la conductivité qui pourrait aussi être corrélée aux flux polluants.

En outre, les premiers résultats de Mlle Lacour amènent à penser que les pollutions entraînées par une pluie sont largement décorrélées des caractéristiques de cette pluie. La turbidité présente en effet une grande variabilité et cette variabilité n'est liée en rien aux caractéristiques des pluies. Ce résultat corrobore la décorrélation observée dans les figures précédentes entre les volumes déversés et la concentration de polluants.

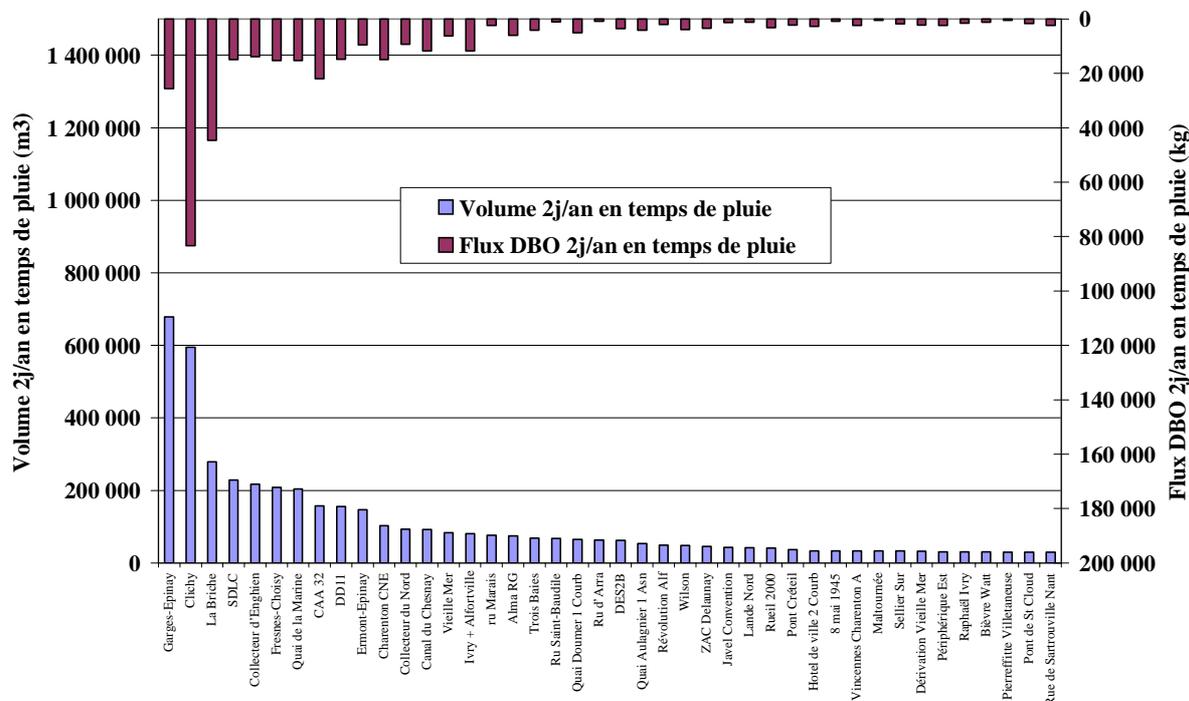
Ainsi, il semble difficile d'attacher de façon fiable un flux polluant à un déversement. Toutefois, l'étude des différents points de déversements par temps de pluie dans la Seine montre que l'essentiel de la pollution est déversée en quelques points principaux. La figure suivante, issue du rapport PROLOG, montre l'importance relative des déversoirs d'orage de la région parisienne. Sur chaque point de rejet sont calculés les flux polluants liés au volume déversé deux fois par an en moyenne. Les flux sont obtenus par multiplication du volume déversé par une concentration moyenne annuelle, critère relativement fiable pour des considérations d'ordre général.



Source : SIAAP, État des lieux des déversements au milieu naturel

*Contributions relatives des points de rejet par temps de pluie aux volumes et flux cumulés 2j/an*

On constate que les principaux déversoirs d’orage (DO) ont une importance relative très grande dans la pollution totale en DBO<sub>5</sub> déversée dans la Seine. Ce résultat justifie les travaux entrepris par le SIAAP pour diminuer les rejets de ces principaux déversoirs par la création de bassins de stockage. Le graphique suivant permet de visualiser différemment cette contribution des différents déversoirs.



Source : id.

*Hiérarchisation des principaux points de rejet en volume déversé 2x/an et en flux de DBO rejeté 2 x/an (hors STEP SIAAP)*

On constate que, pour la DBO<sub>5</sub>, les deux principaux déversoirs d'orage sont Clichy et La Briche. Dans la suite de ce rapport, nous utilisons le fait que ces deux déversoirs soient représentatifs de la majorité de la pollution déversée à la Seine pour évaluer l'impact des déversements à la Seine. En toute rigueur, selon les pluies et les configurations, ces deux déversoirs ne vont pas toujours être représentatifs de la pollution mais ils s'en approchent tout de même assez. En outre, les mesures installées en continu sur ces 2 déversoirs permettent de relier les mesures de qualité de la Seine à celles de la pollution déversée.

### 3.3.3. Évaluation de l'impact des déversements sur la qualité de la Seine

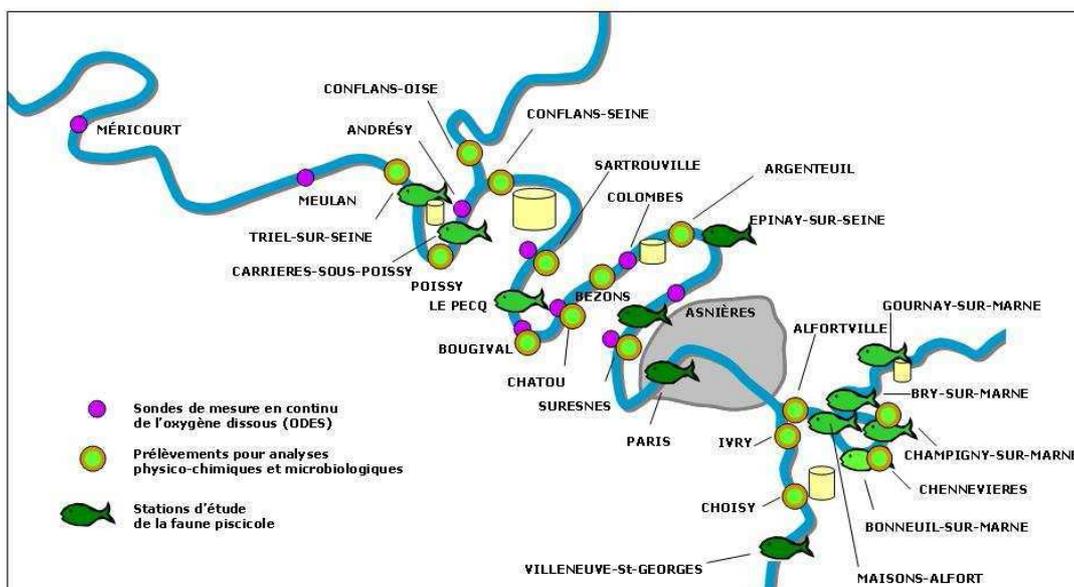
#### A. Mesures en Seine

Un très grand nombre de mesures sont installées aujourd'hui sur la Seine pour en évaluer la qualité. D'une part, les compagnies de production d'eau potable suivent de très près la qualité de l'eau de la Seine au niveau de leur captage. D'autre part, un certain nombre d'organismes ont mis en place des réseaux de mesure, en particulier le SIAAP.

Le réseau de mesures du SIAAP comprend actuellement entre autres :

- des sondes de mesure de la température et de l'oxygène dissous au pas de temps 15 minutes réparties le long de la Seine entre Suresnes et Méricourt. Ces sondes fournissent une base de données exceptionnelle de la mesure de l'oxygène dissous en Seine. Comme nous le verrons plus loin, l'oxygène dissous est un paramètre intégrateur de la qualité de l'eau donc ces mesures sont très précieuses ;
- des prélèvements ponctuels réalisés toutes les semaines de différents paramètres physico-chimiques tels l'azote, le phosphore, la DBO<sub>5</sub>, la chlorophylle a, etc. entre Choisy et Triel ;
- des prélèvements ponctuels réalisés tous les 15 jours aux mêmes stations pour une analyse bactériologique ;
- des mesures en entrée et sortie des stations d'épuration.

Les points de mesures sont rappelés sur la figure ci-dessous.



Source : SIAAP

#### Points de surveillance du SIAAP

## B. Impacts de déversements

Cet excellent réseau de mesures permet de suivre les conséquences des déversements de temps de pluie en Seine. D'après les travaux de B. Chocat, J-L Bertrand-Krajewski et S. Barraud, cités par D. Antonucci, A. Gross, L. Hita Baeza et C. Metays dans le rapport de l'atelier Hydrosystèmes « La pollution de temps de pluie » en juin 2008, on peut distinguer six types d'impacts différents dus aux rejets de temps de pluie :

- **les impacts physiques** : les débits importants peuvent entraîner (en des lieux différents du même hydrosystème) une accélération de l'érosion des berges et du fond et une augmentation localisée des dépôts solides ;
- **désoxygénation et chocs anoxiques** : les Rejets Urbains de Temps de Pluie (RUTP) sont chargés en matières organiques rapidement biodégradables (essentiellement MES et pollution carbonée et azotée). Dès l'arrivée des RUTP dans le milieu, les bactéries du milieu naturel vont dégrader la pollution carbonée en consommant de l'oxygène, entraînant une diminution de la teneur en oxygène dissous du cours d'eau. Les conditions générales peuvent amplifier ce phénomène, en particulier l'été, quand les températures élevées favorisent l'activité bactérienne. La désoxygénation peut parfois être telle qu'elle entraîne une mortalité piscicole élevée. La présence d'azote ammoniacal dans les rejets amplifie les conséquences de la désoxygénation en augmentant la toxicité pour les poissons.  
Les chocs anoxiques les plus importants ont eu lieu lors d'orages estivaux, lorsque le débit de la Seine est très faible et que le débit d'eaux pluviales devient soudainement quasiment équivalent à celui de la Seine. Dans les années 1980-1990, des mortalités piscicoles consécutives à des orages survenaient tous les deux à trois ans. Ils ont permis de prendre conscience de deux choses : d'une part du retour des poissons dans la Seine (même si l'on s'en rendait compte au moment de leur mort massive), d'autre part de la nécessité absolue de résoudre les problèmes des RUTP, en particulier à l'étiage.

Ces deux impacts se font à très court terme, très peu après l'arrivée massive de RUTP dans le milieu naturel. C'est sur la désoxygénation que nous nous pencherons plus précisément.

- **effets toxiques à long terme des micropolluants** : du fait du ruissellement sur les surfaces urbaines, les RUTP sont l'une des sources principales de micropolluants toxiques minéraux, en particulier métalliques (plomb, zinc, cuivre, chrome, nickel, cadmium...) ou organiques (ammonium, phénols, tensioactifs, pesticides, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques...)  
En général les concentrations sont suffisamment faibles pour ne pas déclencher de toxicité aiguë. Cependant, de nombreuses études montrent que les RUTP peuvent avoir des effets cancérigènes. De plus, les micropolluants ne se dégradent pas, ils s'accumulent et il y a un risque réel d'accumulation dans la chaîne alimentaire, notamment pour les métaux et les pesticides. Cette toxicité se traduit en général par un appauvrissement de la biodiversité et constitue une menace pour la pêche mais elle peut aussi avoir des conséquences sur la santé humaine.
- **hyper eutrophisation** : accélération du phénomène naturel d'eutrophisation lié à des apports accrus en nutriments.

- **pollution bactériologique et risques sanitaires** : quatre types d'organismes sont susceptibles d'affecter la santé humaine : virus, bactéries, protozoaires et vers parasites. Ces organismes proviennent quasi exclusivement de contaminations d'origine fécale. La contamination se fait soit par ingestion, soit par contact. La très grande majorité des contaminations bactériennes des zones de baignade viennent des RUTP.
- **pollution visuelle** : les pollutions visuelles (flottants, irisations, turbidité,...) et olfactives n'ont pas forcément un impact très important sur le milieu mais elles sont ressenties fortement par les riverains.

*C. L'oxygène, paramètre intégrateur de la qualité d'un cours d'eau*

Comme le montre le tableau de la conformité de la Seine avec le Bon État écologique, la qualité d'un cours d'eau est appréciée par un grand nombre de paramètres différents. Cependant, parmi ces paramètres, l'oxygène dissous jouit d'un statut particulier. En effet, même s'il ne prend pas en compte tous les paramètres de qualité tels les micro-polluants, il interagit avec un grand nombre de paramètres et détermine entre autres la possibilité pour les poissons de se développer. C'est ce qui fait que cet indicateur a été choisi par le SIAAP pour donner la qualité de l'eau de la Seine, mise à jour quotidiennement sur son site Internet.

On peut lister au moins 9 phénomènes influant sur le taux d'oxygène dissous en rivière.

1. **La saturation en oxygène.** Un phénomène physique fait que le taux de saturation en oxygène dissous est fonction de la température. D'après Gérard Copin-Montégut, dans son enseignement de l'université de l'Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer, l'algorithme le plus fiable de calcul de la solubilité de l'oxygène dissous est celui de Benson & Kraus (1984) où  $C^{\circ}$  est le seuil de saturation en oxygène dissous et  $T$  la température de l'eau :

$$\begin{aligned} \ln C^{\circ} = & - 135,29996 + 1,572288 \times 10^5 / T - 6,637149 \times 10^7 / T^2 \\ & + 1,243678 \times 10^{10} / T^3 - 8,621061 \times 10^{11} / T^4 \\ & - (0,020573 - 12,142 / T + 2,3631 \times 10^3 / T^2) \cdot S \end{aligned}$$

C'est celui-ci que nous utiliserons dans la suite en considérant un taux de salinité  $S$  nul. Le tableau ci-dessous donne les valeurs du seuil de saturation en oxygène par pas de 5°C.

Température	Saturation en oxygène dissous
°C	mgO <sub>2</sub> /L
0	14,6
5	12,8
10	11,3
15	10,1
20	9,1
25	8,3
30	7,6

Source : Fabien Esculier

*Saturation en oxygène dissous en fonction de la température*

On constate que les eaux froides permettent physiquement d'avoir plus d'oxygène que les eaux chaudes. Ce paramètre tend à fragiliser la qualité de l'eau en été quand la température est élevée.

Parmi les autres paramètres, 4 paramètres ont une contribution positive et 4 autres ont une contribution négative.

**2. La photosynthèse.** Ce processus est conditionné par la présence d'algues et d'ensoleillement. Les algues ont beaucoup été étudiées car certaines algues peuvent rendre les eaux toxiques et impropres à la production d'eau potable. Elles sont majoritairement situées dans les premiers centimètres d'eau, là où l'intensité lumineuse est encore assez forte pour réaliser la photosynthèse. Elles apparaissent en février – mars à Paris.

L'origine de la présence d'algues dans les rivières est toujours relativement controversée. Les algues ne se meuvent pas d'elles-mêmes. Elles suivent donc le courant. A priori, leur présence dans la Seine à Paris a donc pour origine leur développement dans les petits ruisseaux en amont du bassin de la Seine. Les rivières étant souvent eutrophes de par les apports de l'agriculture, les algues peuvent souvent facilement se développer en amont de Paris. Selon M. Poulin, les algues à Paris pourraient provenir d'algues de fond de ces petits cours d'eau eutrophes, qui se détachent et sont alors entraînées par le courant. Cette hypothèse reste toutefois à vérifier.

Lorsque la présence d'algues est couplée à un fort ensoleillement, les algues se développent et saturent la rivière en oxygène, dépassant parfois le seuil de saturation de l'oxygène et formant donc des bulles d'oxygène. Malheureusement, cette forte oxygénation est souvent ensuite suivie d'une baisse de l'oxygène qui, couplée à un déversement, peut faire baisser le taux d'oxygène à un niveau fatal pour la vie piscicole.

**3. L'aération à l'interface air-eau.** Ce processus d'oxygénation a lieu par diffusion et peut être favorisé par le vent.

**4. L'oxygénation par surverse ou sousverse.** Par exemple au niveau d'un barrage, la chute d'eau provoque une forte réoxygénation de l'eau. C'est ainsi que les zones les plus pauvres en oxygène sont les zones immédiatement en amont des barrages.

**5. La dénitrification.** Ce cas particulier, valable uniquement en cas d'absence d'oxygène, intervient lorsque les bactéries n'ont plus que les nitrates comme oxydants et s'en servent pour leur métabolisme. La dénitrification se fait naturellement dans les zones stagnantes. D'après M. Rakedjian, ce phénomène amène à penser qu'il serait plus judicieux de laisser les nitrates en sortie de station d'épuration, au lieu de dénitrifier en usine, et de préserver un certain nombre de zones où la dénitrification naturelle peut se faire.

Les 4 paramètres dont la contribution est négative sont les suivants :

**6. La respiration du phytoplancton.** En plus de la photosynthèse, les algues respirent et consomment donc de l'oxygène. Toutefois, le bilan total est une production nette d'oxygène. D'après M. Poulin, même lorsque les algues meurent et qu'elles sont dégradées par la biomasse, le bilan d'oxygène reste strictement positif car les algues sont constituées en partie de carbone réfractaire qui ne sera dégradé que plus en aval, dans l'estuaire de la Seine.

**7. La respiration des bactéries et du zooplancton.** Elle est liée au développement du zooplancton et c'est elle qui fait baisser le taux d'oxygène lorsqu'un déversement apporte une grande quantité de matière organique, dégradée par le zooplancton.

**8. La nitrification.** L'azote sous forme réduite est oxydé par les bactéries nitrifiantes de la rivière avec consommation d'oxygène.

**9. Le flux benthique.** Une partie de l'oxygène diffuse vers les sédiments de la rivière.

On voit donc que l'oxygène dissous est en interaction avec la majorité des phénomènes impactant la qualité de la rivière. Nous avons vu deux des principaux mécanismes qui influent sur l'oxygène dissous : la production d'oxygène dissous par la photosynthèse et la consommation d'oxygène dans les processus de dégradation de matière organique.

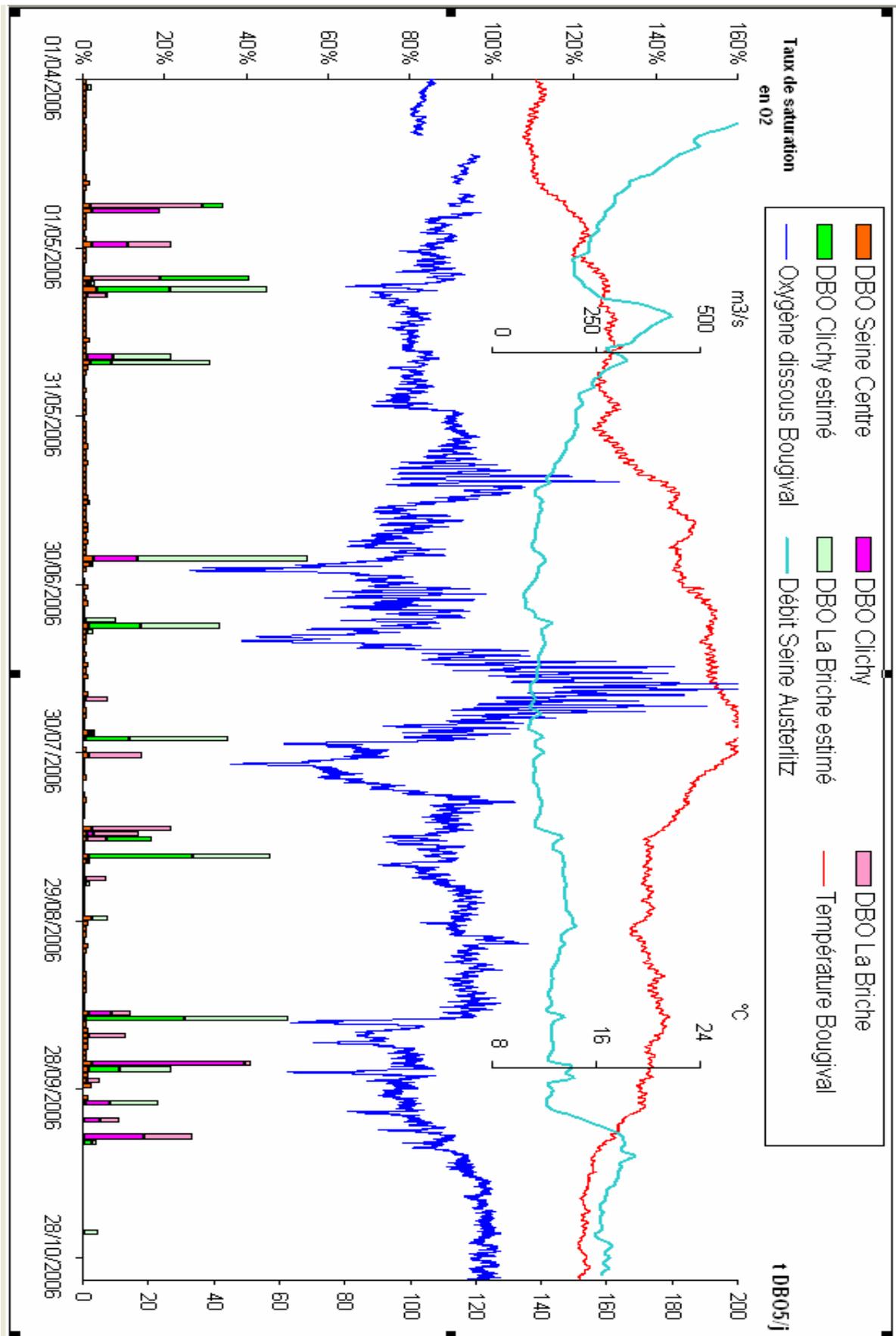
#### *D. L'oxygène dissous en Seine en 2006 et 2007*

L'oxygène dissous étant un paramètre intégrateur de la qualité de la Seine et les déversements de temps de pluie agissant directement sur l'oxygène dissous par la matière organique et l'azote réduit déversé, nous allons chercher à interpréter les relations entre les déversements et l'oxygène dissous. L'ensemble des données mentionnées auparavant et récupérées auprès du SIAAP permettent d'établir une courbe de suivi de l'oxygène dissous en différents points de la Seine. Les graphiques suivants présentent une superposition de différentes courbes qui doivent permettre d'obtenir une vue d'ensemble de l'état de la Seine. Nous avons choisi de nous concentrer sur Bougival afin d'être en amont du déversement de l'usine d'Achères mais en aval des déversoirs principaux de Clichy et La Briche.

Ainsi, sur la période avril-octobre 2006 et 2007, période de l'année durant laquelle la Seine est la plus fragile, nous avons représenté :

- les déversements en matière organique de l'usine Seine Centre issus de l'autosurveillance ;
- les déversements en matière organique de Clichy et La Briche. Comme environ une mesure sur deux seulement a été effectuée, nous avons estimé les déversements lorsque nous n'avons pas de mesure par une concentration moyenne en matière organique. Nous avons vu précédemment que cette estimation pouvait être très grossière mais nous n'avons pas trouvé de meilleure estimation. Les valeurs mesurées sont représentées en rose et les valeurs estimées en vert ;
- l'oxygène dissous au pas de temps 15 minutes. Les séries de mesure présentent quelques trous qui ne nuisent pas à l'interprétation générale. Afin de prendre en compte l'impact physique du taux de saturation en oxygène, l'oxygène est représenté en taux de saturation de l'oxygène dissous et non en concentration ;
- la température de l'eau au pas de temps 15 minutes ;
- le débit de la Seine à la station de mesure quotidienne d'Austerlitz.

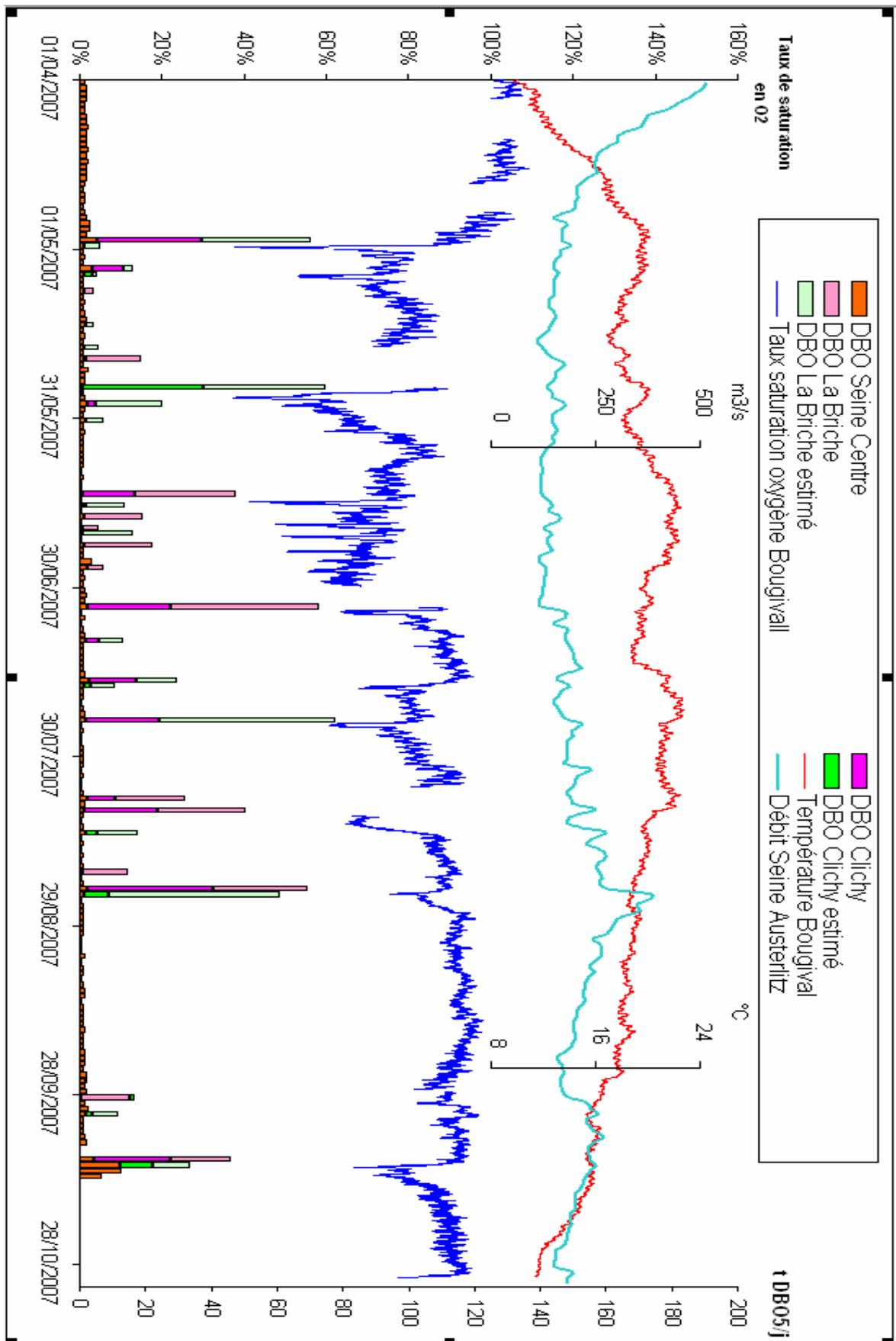
Ces deux dernières séries sont représentées sur une échelle spéciale afin de pouvoir superposer les courbes.



Source : Données SIAAP, graphique Fabien Esculier

*Oxygène dissous dans la Seine à Bougival et rejets de matière organique à l'été 2006*

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées



Source : Données SIAAP, graphique Fabien Esculier

*Oxygène dissous dans la Seine à Bougival et rejets de matière organique à l'été 2007*

Vers une gestion cyclique des déchets et des eaux usées

## *E. Interprétation*

### *Année 2006*

Pour l'année 2006, on constate que la période d'étiage vers 150 m<sup>3</sup>/s se situe entre début juin et fin septembre. Les températures de l'eau ont été exceptionnellement élevées avec des maxima frôlant les 28°C.

Les développements de phytoplancton sont nettement apparents, début juin et fin juillet. Celui de la fin juillet, très remarquable et entraînant des sursaturations dépassant 150%, est corroboré par les valeurs de chlorophylle mesurées par le SIAAP : le pic de chlorophylle *a* est mesuré à Sartrouville le 17 juillet à 34 µg/L (la chlorophylle *a* est inférieure à 10 µg/L en temps normal). Le développement de début juin est probablement très local car il n'apparaît pas sur les autres stations et aucun pic de chlorophylle n'est mesuré. Il peut aussi s'agir d'un autre phénomène.

Les phases de photosynthèse intense sont caractérisées par une forte variation nyctémérale de l'oxygène dissous car les algues produisent de l'oxygène uniquement pendant la journée.

Les baisses d'oxygène dissous consécutives aux déversements sont relativement marquées. On constate que la fin de l'épisode de sursaturation, probablement due à un rayonnement moins intense, a été suivie de deux déversements qui ont fait chuter le niveau d'oxygène dissous en dessous de 40%. L'événement pluvieux de la fin juin a été le plus dommageable et aussi celui le plus chargé en matière organique (près de 80 tonnes de DBO5 estimées !).

Hormis les phénomènes mentionnés ci-dessus, le taux d'oxygène dissous semble s'établir entre 80 et 100% du taux de saturation. La courbe de l'oxygène dissous semble suivre une tendance inverse de celle de la température, ce qui corrobore le fait que les bactéries se développent mieux quand les températures sont élevées. Entre la fin septembre et la fin octobre, la difficile montée de l'oxygène de 80% à 100% semble s'expliquer par de fréquents déversements et la baisse des températures.

Ce graphique incite à chercher une détermination du taux d'oxygène dissous en le corrélant avec la température et, dans une moindre mesure, avec le débit. Nous étudierons la pertinence de cette corrélation ultérieurement.

### *Année 2007*

Les températures en 2007 ont été beaucoup plus modestes et l'étiage moins marqué.

Les chutes d'oxygène dissous consécutives aux déversements sont nettement marquées mais l'importance de la diminution ne semble pas corrélée à la quantité de pollution déversée. Cette corrélation a de toute façon peut de chance d'aboutir car beaucoup de valeurs de polluants déversés sont estimées et non mesurées et les déversements des autres déversoirs entrent aussi en jeu.

Les valeurs d'oxygène dissous s'échelonnent aussi entre 80% et 100% sauf entre mai et juin où les déversements répétés et la montée des températures semblent avoir fait chuter l'oxygène dissous aux alentours de 70%.

Ces graphiques pourraient être avantageusement complétés par la donnée du rayonnement solaire qui indique l'importance de la photosynthèse (en cas de présence d'algues) et donc la hausse de l'oxygène dissous. Cet élément est manquant pour une interprétation plus fine du taux d'oxygène dissous. Malheureusement, cette donnée n'était pas disponible lors de l'élaboration de ces courbes. Son intégration devrait faire l'objet d'un prochain travail.

### 3.3.4. Évaluation d'un niveau d'oxygène dissous de référence

Afin de juger de la qualité de la Seine et de l'impact d'un déversement sur celle-ci, il semble opportun de chercher à définir un état standard de la Seine. Un travail de ce type a été réalisé par Mme Paffoni à la DRD du SIAAP sur l'oxygène dissous pour l'établissement du bulletin quotidien d'information sur l'oxygène dissous transmis au SIAAP, à la Section d'Assainissement de Paris (SAP) et à la Police de l'eau. Ce travail est explicité dans une note datant d'octobre 2005.

L'objet de ce travail était d'obtenir une valeur de l'oxygène dissous à laquelle on pourrait s'attendre, « compte tenu du débit et de la température observés le jour d'émission du bulletin ». Cela devrait permettre de « juger de la "conformité" de la mesure du jour "à la moyenne des mesures" faites les années précédentes dans les mêmes conditions. »

L'idée est alors, sur la base de données de plusieurs années de mesure de l'oxygène dissous au pas de temps 15 minutes, de chercher une corrélation du type :

$$O_2 = a + b.(\text{Débit de Seine à Austerlitz}) + c.(\text{Température de l'eau})$$

Où :

a, b, c : coefficients numériques,

$O_2$  = en mg/l, exprime la valeur moyenne journalière en oxygène dissous ;

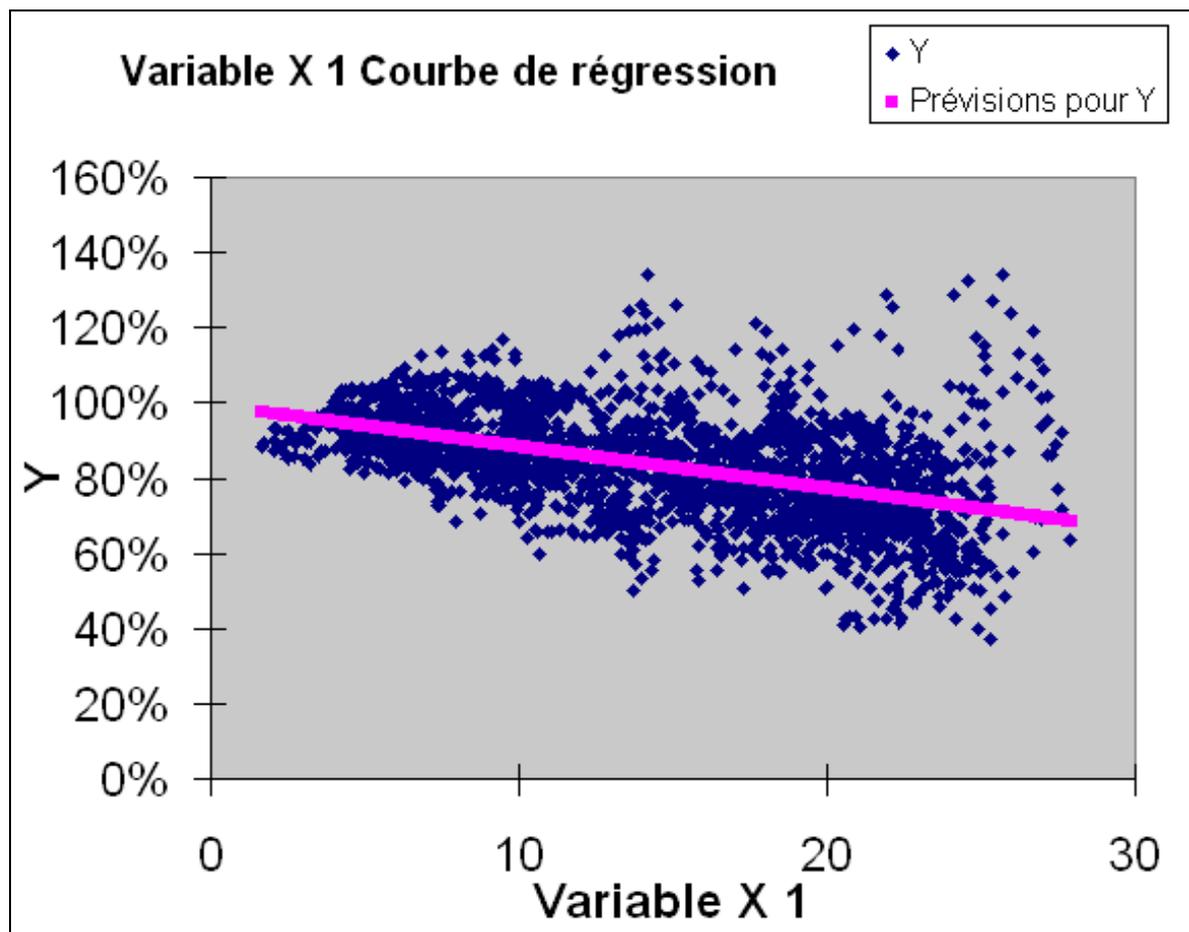
Débit de Seine = en  $m^3/s$ , valeur instantanée fournie par le SNS le matin, noté Q ;

Température de l'eau = en °C, valeur moyenne journalière, notée T ;

La valeur moyenne journalière est censée permettre « d'estomper le poids d'événements exceptionnels tels que déversements, bloom algaux et de rendre compte d'un état moyen de la Seine ». Ce point semble discutable car les courbes précédentes montrent que l'impact des déversements se fait sentir typiquement sur 24h mais semble aussi avoir un effet global quand les déversements se répètent. En outre, les blooms algaux apportent un gain net d'oxygène comme en juillet 2006 et font donc sortir durablement la valeur de l'oxygène dissous d'une valeur standard fonction de la température et du débit.

En outre, après examen, la corrélation entre l'oxygène dissous et le débit est loin d'être évidente. Le terme  $bQ$  est en pratique très faible devant  $cT$ . De plus, selon les stations, le terme  $b$  est positif ou négatif alors qu'il semble peu logique que le débit influe différemment selon le bief de la Seine étudié.

Afin de les analyser, les courbes de régression linéaires ont été refaites. L'oxygène dissous en mg/L a été remplacé par le taux de saturation en oxygène dissous afin d'effacer le phénomène physique de corrélation de la saturation avec la température. On trouve alors les courbes de régression suivantes sur les années 2000 à 2007 à Bougival.



Source : Données SIAAP, graphique Fabien Esculier

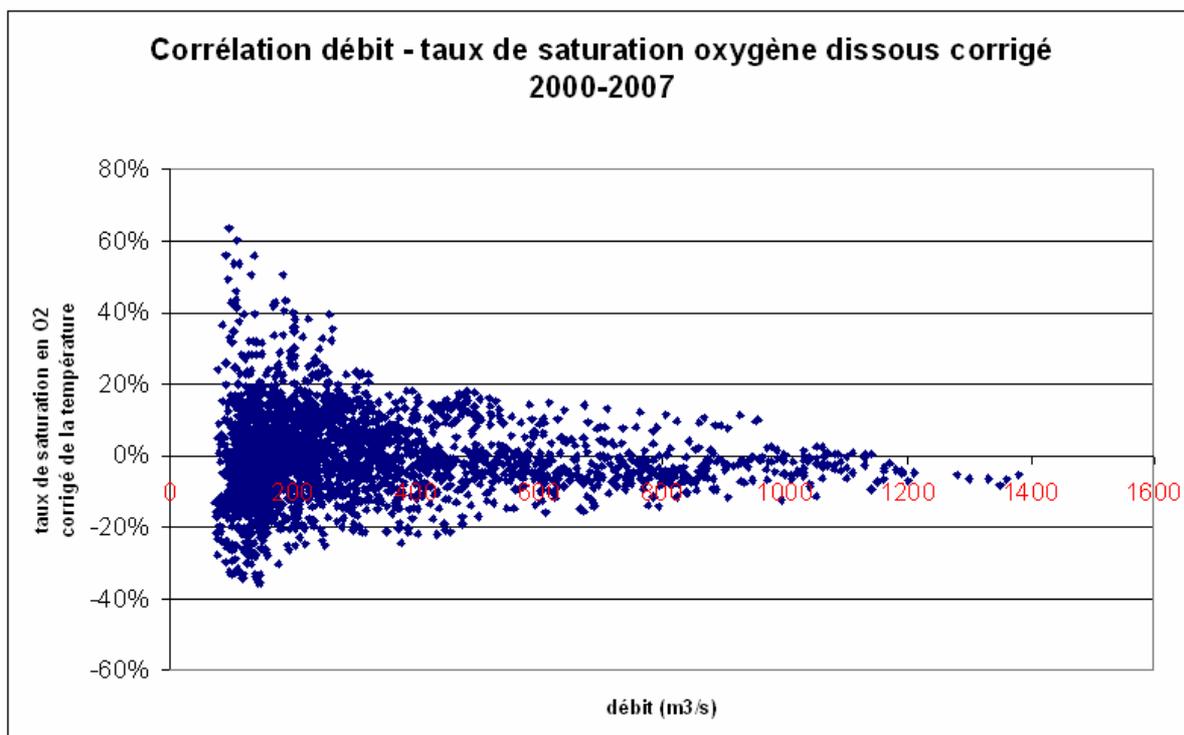
*Courbe de régression de l'oxygène dissous en fonction de la température à Bougival entre 2000 et 2007*

Dans la figure ci-dessus, X1 est la température en degrés Celsius et Y l'oxygène dissous exprimé en pourcentage du seuil de saturation. On constate que l'oxygène dissous diminue quand la température augmente. Ceci illustre l'effet mentionné précédemment, à savoir que l'activité bactérienne augmente avec la température, consommant ainsi plus de d'oxygène. On remarque aussi les points sortant nettement de la courbe de régression qui correspondent aux chocs anoxiques suite aux déversements et aux blooms algaux. Numériquement, la régression ci-dessus donne l'équation suivante :

$$O_2 = 99,34\% - 1,11\% \cdot T$$

L'analyse réalisée par le SIAAP montre une amélioration des coefficients entre une régression faite sur les années 1995-2000 et les années 2000-2005 avec un taux d'oxygène plus élevé de 6% en moyenne. Ce résultat traduit une amélioration globale des eaux vis-à-vis de l'oxygénation. Il montre aussi que l'exercice de régression linéaire montre ses limites s'il est réalisé sur un trop grand nombre d'années car l'amélioration de la qualité de l'eau modifie la valeur de l'oxygène « standard ».

Pour ce qui est du débit, la corrélation avec l'oxygène dissous est moins évidente. Le graphique suivant montre la corrélation entre le débit et le taux d'oxygène dissous corrigé de l'effet température mis en évidence ci-dessus.



Source : Données SIAAP, graphique Fabien Esculier

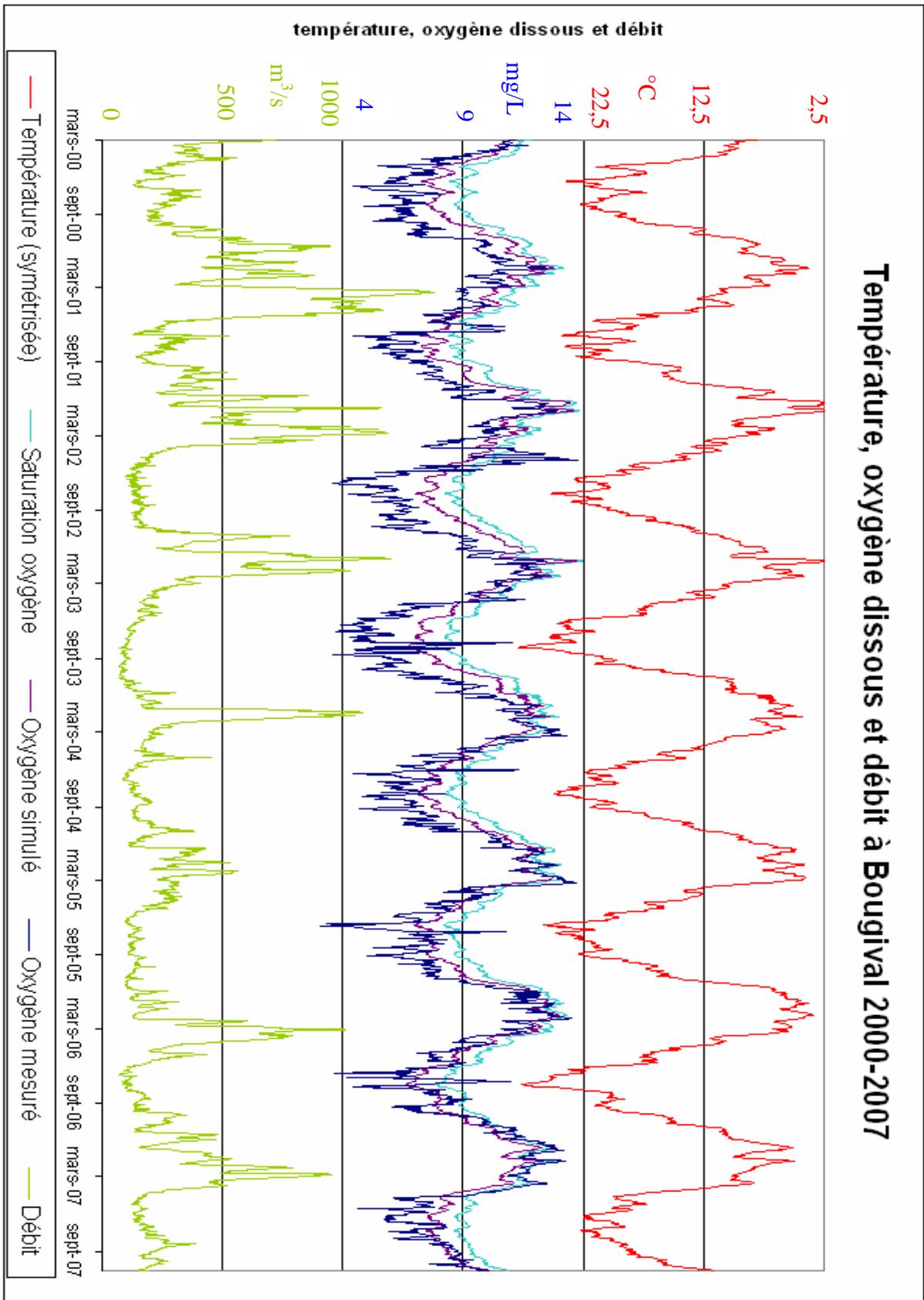
*Corrélation entre l'oxygène dissous corrigé de la température et le débit  
à Bougival entre 2000 et 2007*

Sur cette figure, le débit est représenté en abscisse en  $m^3/s$  et le taux de saturation en oxygène en ordonnées, auquel on a soustrait le taux attendu d'après la régression linéaire précédemment faite. Il apparaît que le taux d'oxygène dissous est décorrélé du débit. Les points pour lesquels le taux d'oxygène dissous s'écarte de plus de 20% par rapport au taux issu de la corrélation correspondent uniquement à des faibles débits. Les fortes saturations sont dues à des blooms algaux, les faibles saturations à des déversements. Ainsi, si le débit est certes un facteur déterminant de la qualité de la Seine, il ne semble pas pertinent lorsque l'on travaille sur des valeurs moyennes pour obtenir un taux d'oxygène de référence.

On obtient donc une estimation relativement correcte de l'oxygène dissous en utilisant uniquement la température. Cette valeur n'est cependant pas très robuste. Elle ne prend certes pas en compte les chocs anoxiques et les blooms algaux mais elle ne permet pas non plus de suivre correctement certaines variations de l'oxygène. Elle permet toutefois, certaines années, d'approcher convenablement la courbe d'oxygène dissous comme le montre le graphique suivant.

On y voit, de 2000 à 2007 :

- le débit de la Seine ;
- trois taux d'oxygène : en bleu foncé le taux d'oxygène mesuré, en bleu clair le taux de saturation en oxygène (le maximum physique), en violet le taux calculé d'après l'équation de la page précédente ;
- la température de la Seine représentée en ordonnées descendantes afin de mieux visualiser sa corrélation avec l'oxygène.



Source : Données SIAAP, graphique Fabien Esculier

*Température, oxygène dissous et débit de la Seine à Bougival de 2000 à 2007*

Afin d'améliorer encore cette formule prédictive de l'oxygène dissous, plusieurs voies sont envisageables.

- **Prendre en compte le rayonnement solaire.** Ce travail devrait être réalisé prochainement avec les données de rayonnement. Il faudra trouver quel est le rayonnement à prendre en compte : celui de la veille suffira-t-il à donner une tendance de variation de l'oxygène ou faudra-t-il prendre en compte le rayonnement sur plusieurs jours précédents ? Pourra-t-on aussi intégrer le rayonnement en faisant abstraction de la quantité d'algues présentes à ce moment dans la Seine ? A priori, ceci ne sera valable qu'entre février et octobre mais même dans cette période, le rayonnement risque de ne pas être une donnée suffisante car l'importance de la population algale arrivant en amont joue a priori un rôle important.
- **Intégrer les déficits en oxygène dus aux déversements.** Cette intégration pourrait être faite approximativement à condition d'avoir des données fiables et régulières sur les déversoirs principaux.
- **Intégrer les périodes de blooms algaux.** Cette intégration est à faire en parallèle de la prise en compte du rayonnement solaire.

### 3.3.5. Logiciels d'évaluation de la qualité de l'eau

Les analyses exposées précédemment conduisent finalement à réaliser un petit programme d'évaluation de l'oxygène dissous. Or des logiciels d'évaluation de la qualité de l'eau existent déjà. Pour l'évaluation de l'oxygène dissous, beaucoup utilisent le modèle de Streeter et Phelps (1925) pour l'impact des déversements :

$$D = \underbrace{\frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} [e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}]}_{\text{Déficit en oxygène résultant de la charge}} + \underbrace{D_0 e^{-k_2 t}}_{\text{Déficit initial en oxygène dû à la saturation}}$$

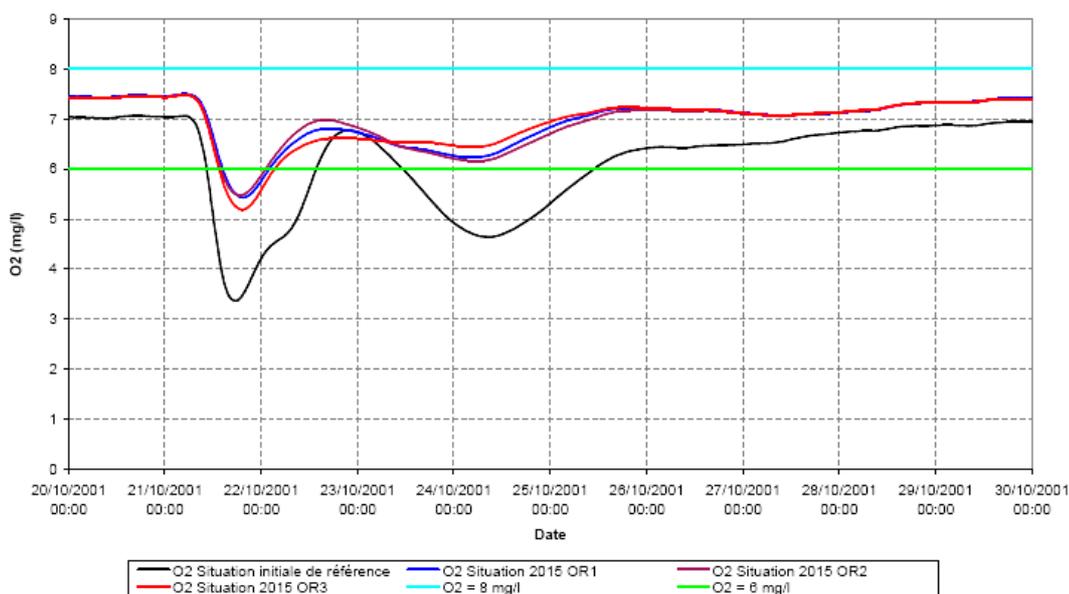
pour lequel :

- D = déficit en oxygène dissous (de la saturation) (mg/L),
- t = temps de déplacement dans le courant du point de rejet au point d'intérêt (jours),
- k<sub>1</sub> = constante de vitesse de la décroissance de la DBO (jour<sup>-1</sup>),
- k<sub>2</sub> = constante de vitesse de la ré-aération (jour<sup>-1</sup>),
- L<sub>0</sub> = DBO initiale immédiatement en aval du rejet (mg/L) et
- D<sub>0</sub> = déficit en oxygène dissous immédiatement en amont du rejet (mg/L).

En France, un logiciel sophistiqué de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique a été développé à l'École des Mines. Il s'agit du logiciel ProSe. Son objectif est de pouvoir étudier le fonctionnement écologique d'un système fluvial à l'échelle de son bassin versant. Ce logiciel modélise dans le détail un très grand nombre de paramètres. Il est utilisé aujourd'hui par le SIAAP pour l'évaluation des impacts d'aménagements sur le milieu récepteur.

Ainsi, ProSe a simulé toute l'année 2006 en comparant les résultats de ses simulations avec les mesures effectuées. Ce rapport permettrait d'ailleurs de compléter les interprétations exposées précédemment. Malheureusement, il ne m'a pas encore été transmis au moment de la rédaction de ce rapport.

Utilisé dans le cadre de l'étude d'actualisation du schéma d'assainissement de la zone centrale de la région Île-de-France, ProSe sert à choisir les aménagements qui auront le plus faible impact sur la qualité de la Seine. À titre d'exemple, la courbe ci-dessous figure l'impact de 3 aménagements différents et de la situation de référence sur le niveau d'oxygène dissous à Andrésy.



Source : SIAAP

#### *Oxygène dissous à Andrésy en temps de pluie dans 4 situations différentes*

La situation de référence est figurée par la courbe noire et les situations avec aménagement par les autres courbes. On constate sur cette courbe le premier effet de choc anoxique mais on constate aussi l'existence d'un impact différé. Les chocs anoxiques se passent en effet en deux temps : un premier temps où la matière organique est immédiatement dégradée et fait soudainement baisser le niveau d'oxygène, un deuxième temps où cette matière organique est relarguée et fait baisser le niveau d'oxygène de façon moins importante et plus étalée dans le temps. Cet effet est difficilement visible dans les courbes 2006 et 2007 du fait de la complexité des situations réelles. Cependant, il pourrait être pris en compte pour une meilleure modélisation des chocs anoxiques.

ProSe permet aussi la modélisation de la plupart des autres paramètres de qualité tels l'azote, le phosphore, la chlorophylle, etc. qui sont indispensables à étudier afin de prendre en compte tous les paramètres. Comme nous l'avons vu précédemment, la Seine à Poissy respecte le bon état écologique vis-à-vis de l'oxygène mais pas du phosphore total et il faut donc prendre aussi ces paramètres en compte.

### 3.3.6. Adjonction d'un module qualité à MAGES

En définitive, pour l'adjonction d'un module qualité à MAGES, il ne semble pas justifié de développer un logiciel trop complexe. En effet, comme mentionné précédemment, les capacités prédictives de la modélisation des RUTP sont relativement limitées. L'évaluation de l'impact d'un déversement doit donc rester simple. Deux options semblent se dessiner :

1. Utiliser le logiciel ProSe, déjà appliqué aux tronçons concernés par MAGES. Ce logiciel présente l'avantage d'avoir une expérience de plusieurs années sur la qualité de la Seine. En revanche, il présente encore quelques lacunes dans la modélisation de la qualité de la Seine. En particulier, s'il sait bien réaliser des modélisations annuelles de qualité de la Seine, il divergerait probablement sur des modélisations continues de plusieurs années, du fait entre autres d'une prise en compte incomplète des effets de dépôt et transport de vase.

En outre, si la sophistication de ProSe permet de modéliser finement un grand nombre de paramètres, elle a aussi l'inconvénient d'en faire un modèle relativement lourd qui nécessite un temps de « chauffe » et d'intégration de données sur une trentaine de jours précédant le jour à modéliser.

Ainsi, ProSe est aujourd'hui plus adapté à une modélisation à froid de la qualité de la Seine, dans une optique prospective ou une optique de bilan. MAGES, quant à lui, est un outil de gestion en temps réel. Il semble donc plus opportun d'y adjoindre un module qualité, peut-être moins sophistiqué et précis, mais plus adapté à la gestion en temps réel.

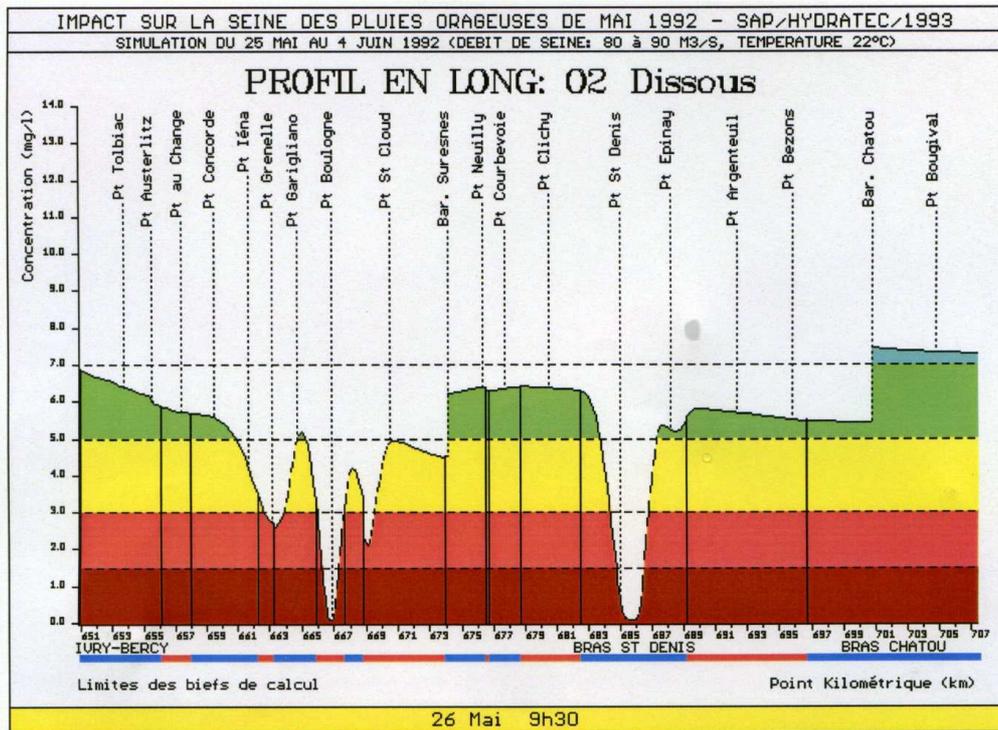
Si ProSe devait être couplé à MAGES, il faudrait a priori faire tourner ProSe 24h/24, afin qu'il modélise en permanence l'état de la Seine et, lors de l'arrivée d'un événement pluvieux, il serait alors prêt à tester l'impact de différentes stratégies proposées par MAGES. Ce dispositif semble un peu lourd à mettre en place.

2. Utiliser ou adapter un logiciel de qualité existant plus simple que ProSe. Il existe déjà un certain nombre de logiciels de qualité et il conviendrait d'étudier quels sont ceux qui seraient le plus adaptés. Mon stage à Hydratec m'a permis de découvrir MOKA-Eau, logiciel développé par Hydratec après la loi sur l'eau de 1992.

Avant que ProSe ne soit utilisé par le SIAAP pour ses études d'aménagement, ce rôle était rempli par MOKA-Eau. Ce logiciel permet une modélisation dynamique des différents paramètres physico-chimiques de qualité de la Seine. Il simule la dilution, la dispersion, la propagation et l'épuration des pollutions dans des régimes d'écoulement permanent.

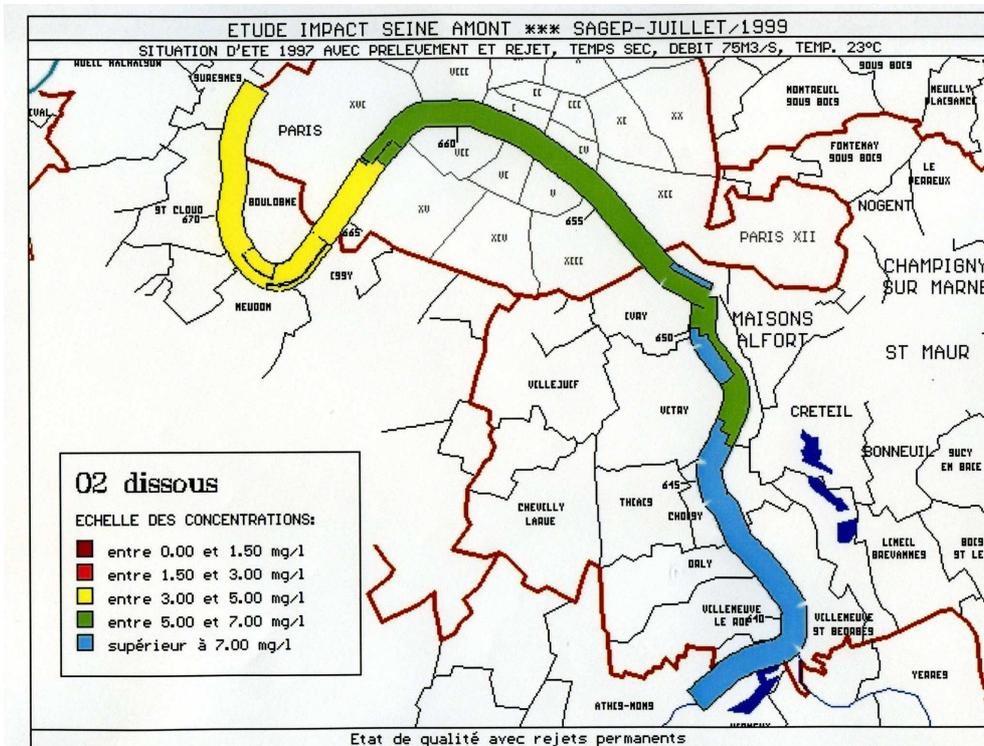
Son utilisation par le SIAAP avait alors permis d'améliorer grandement la connaissance des phénomènes en jeu, par exemple les différences de qualité entre les bras de Seine autour des îles, les temps de transfert de pollution, etc. Les schémas suivants montrent deux types de résultats donnés par MOKA-Eau :

- un profil en long de la Seine donnant les valeurs de l'oxygène dissous, ici lors des orages piscicides de mai 1992 ;
- une visualisation de l'état de la qualité de l'eau de la Seine sur carte, en situation d'été standard.



Source : Hydratec

*Profil en long de la Seine sur graphique par MOKA-Eau*



Source : Hydratec

*Profil en long de la Seine sur carte par MOKA-Eau*

Par sa modélisation relativement simple, MOKA-Eau semble à même de répondre au problème spécifique de la gestion en temps réel de MAGES. L'adaptation de MOKA-Eau à MAGES nécessite cependant un travail de mise au point que mon stage à Hydratec ne m'a malheureusement pas laissé le temps d'aborder.

Ainsi, les quelques pistes exposées dans ce rapport sont encourageantes sur la possibilité de développer un modèle simple et robuste d'évaluation de l'impact d'un déversement de temps de pluie dans la Seine. Ce modèle pourrait aussi servir en dehors du cadre de MAGES afin de donner des résultats pour tout autre problème concernant la qualité de l'eau d'une rivière.

La gestion correcte des eaux pluviales reste un enjeu très complexe. Par ses travaux de grande envergure, le SIAAP privilégie actuellement des méthodes de gestion centralisée. Le développement de solutions locales est aussi en cours et devrait permettre de diminuer les quantités d'eau ruisselées sur nos villes. Cependant, la pollution charriée par les eaux pluviales reste un enjeu délicat à gérer. Les polluants des eaux pluviales, très variés, ne permettent pas aisément de transposer les solutions exposées en deuxième partie pour la gestion des eaux usées domestiques. Seuls un changement profond de notre mode de vie et une meilleure prise en compte des cycles de matière pourraient permettre de diminuer les pollutions des eaux pluviales. En attendant, les déversements d'eaux pluviales au milieu naturel constituent un des enjeux primordiaux de la gestion des eaux urbaines.

## Conclusion

---

Il reste encore beaucoup à faire pour transformer notre logique de production de biens linéaire en un fonctionnement cyclique de la société qui intègre de la même manière déchets et biens produits. Si chacun peut, à son niveau, contribuer à améliorer la gestion actuelle des déchets en favorisant le recyclage, le compostage, une consommation de biens raisonnée et en traitant ses eaux usées du mieux qu'il peut, une gestion cyclique des déchets impose des changements plus profonds et plus radicaux. La conception même de nos biens doit évoluer ainsi que la gestion collective de nos eaux usées afin de respecter les cycles naturels. Concernant les eaux usées, le tri à la source, désormais très largement répandu pour les déchets solides, constituera peut-être une prochaine étape dans l'histoire de l'assainissement. Quoi qu'il en soit, un des leviers les plus importants pour permettre d'améliorer la gestion des déchets réside dans l'éducation des enfants et de la population en général.

Concernant les rejets urbains de temps de pluie, les principes de la gestion cyclique des déchets sont encore loin de pouvoir apporter des solutions pratiques. Il convient toutefois de chercher à minimiser les déversements au milieu naturel, ce que fait aujourd'hui MAGES en région parisienne. L'évaluation de l'impact de ces déversements sur le milieu naturel est délicate et complexe. L'oxygène dissous constitue toutefois un bon indicateur de la qualité de la rivière témoignant de ces déversements. Une évaluation correcte de leurs impacts permet d'améliorer encore la gestion de ces rejets et d'améliorer la qualité de la Seine pour l'atteinte du bon état écologique.

Ce Projet de Fin d'Études s'est déroulé dans d'excellentes conditions, tant en France qu'à Dubaï. Le contexte de travail de la Setec, ainsi que le soutien de M. Gousailles, ont permis de faire de ce stage une conclusion riche et motivante de ma formation d'ingénieur. Ils ont aussi développé ma réflexion sur la gestion des déchets et de l'eau et mon goût, déjà prononcé, pour ces thématiques. Je souhaite que le début de ma vie professionnelle me permette de me montrer digne des enseignements que j'ai reçus jusqu'alors : je les mettrai en pratique avec enthousiasme.



## Remerciements

Pour leur contribution directe ou indirecte à mon travail, et plus généralement à ma passion pour cette thématique, je remercie particulièrement :

- mes parents. Bien avant 1987 et la formalisation du concept de développement durable par Gro Harlem Brundtland, je pense que mes parents faisaient, à la manière de M. Jourdain, du développement durable sans le savoir. Ce mode de vie est probablement partagé par un grand nombre de personnes. En tout cas, mes parents m'ont ainsi enseigné par l'exemple la sobriété, l'économie et le respect : ne pas gaspiller l'eau, la nourriture ou l'énergie, rester raisonnable afin d'être en paix avec la Terre. Plus précisément que la Terre, à la suite de ma lecture révélatrice de l'ouvrage de James Lovelock *Gaïa*, je changerais aujourd'hui cette expression en « être en paix avec Gaïa ». Je crois qu'il s'agit là d'une des clefs du développement durable.

Je remercie mes parents de m'avoir aidé à voyager aux quatre coins du globe et particulièrement mon père qui, toutes les fois qu'il m'emmène randonner en montagne, me rappelle les bienfaits de ces expéditions : « c'est dans les moments difficiles d'une expédition, lorsque l'on ressent réellement des sensations comme la soif ou la faim, que l'on découvre l'incroyable richesse de notre vie : le miracle d'ouvrir un robinet pour disposer d'eau à volonté, l'abondance de nourriture, etc. ». J'espère garder ces enseignements à l'esprit à chaque instant.

- M. Michel Gousailles. Il participait au cours d'hydrologie urbaine de M. Jean-Claude Deutsch et M. Bruno Tassin à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC). Sa verve inimitable et sa passion communicative pour l'assainissement m'ont transmis bien plus qu'une « roupie de sansonnet » et m'ont mené dans cette voie. Qu'il me soit donné d'avoir autant de talent si je dois un jour enseigner et tenter de partager mes passions !

- M. Alain Wicker. Comme il le dit lui-même, très peu de personnes disposent d'une expérience de 40 ans dans le domaine des déchets. J'ai eu la grande chance de suivre son enseignement et je le tiens pour responsable d'avoir définitivement transformé mon geste quotidien de jeter à la poubelle.

- M. Pierre Audibert. Il m'a permis de travailler dans le bureau d'études Hydratec où j'ai pu mener une partie du travail ici présenté dans un cadre enrichissant. J'ai été très marqué par notre premier entretien : dans son discours enthousiaste sur les stations d'épuration, j'y ai perçu un homme qui, se sentant fondamentalement ingénieur, est avant tout préoccupé par l'obtention des meilleures solutions possibles.

- M. Jean-Paul Lebas. Il m'a fait suffisamment confiance pour m'envoyer deux mois aux Émirats Arabes Unis sur cette mission stimulante : comment faire une ville durable à Dubaï ?

- M. François Fiévet. Je le remercie pour l'encadrement de mon stage en assainissement et son aide dans mon travail de fin d'études. Nos conversations m'auront beaucoup appris.

- M. Thierry Lepelletier. Sa motivation sans limite l'excuse de ne pas aimer les « bassines à bactéries » ! Merci pour le temps consacré et les intuitions géniales.

- les élèves, les enseignants et le personnel de l'ENPC, et particulièrement du CEREVERE, les collègues d'Hydratec, de Partenaires Développement et de Canadian University of Dubai, toutes les personnes qui ont gentiment accepté de me recevoir pour ce travail.

- M. Thibaut Chevalier. Mon colocataire en 2007, qui avait dû subir ma première expérience ratée de compost sur balcon, mes remontrances sur le tri, le gaspillage d'eau ou d'énergie, mes discours édifiants sur la chasse d'eau tirée, qui ne nous déresponsabilise pas de nos excréments mais nous permet de les confier à la collectivité pour qu'elle les gère au mieux, etc.

- Mlle Marine Vincenot. Parce que c'est elle. Mais aussi pour avoir enduré encore plus que Thibaut : la douche froide parce que j'avais éteint la veilleuse à 50 W de notre chaudière, la chasse d'eau bricolée mais peu présentable qui économise l'eau, la vaisselle avec 6 L d'eau, tous les déchets que je rechigne à jeter pour leur trouver une meilleure valorisation. J'espère qu'elle continuera à tenir le coup !

# **Bibliographie et entrevues**

ANTONIUCCI, D., GROSS, A., HITA BAEZA, L. et METAYS, C. *La pollution de temps de pluie*. Rapport de l'atelier Hydrosystèmes. ENPC. Juin 2008.

AUBRY, Fabien. SIAAP, Direction de l'exploitation (DDX). Entrevue du 18 mars 2008.

AUDIBERT, Pierre. Hydratec, Président Directeur Général. Entrevue du 7 mars 2008.

BOURQUE, Pierre-André. *Cours « Planète Terre »*. Université Laval, Canada.

URL : [http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html)

CERTU / CETE Sud-Ouest. *Techniques alternatives aux réseaux d'assainissement pluvial*, CERTU, novembre 1998, 155 p.

CHOCAT, Bernard *Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine et de l'assainissement*. Tech.& Doc./Lavoisier, 1 octobre 1996, 1124 p.

DEFREVILLE, Hugues, *Élaboration d'une offre technico-commerciale pour l'installation d'unités de traitement des sous-produits en assainissement*. Rapport de PFE, ENPC, 2007. Extrait non confidentiel.

DELECRIN, Noëlle. IFEN. Entretien téléphonique de septembre 2008.

DEVAUD, Grégoire. *Eaux usées et déchets : l'effort porte sur l'investissement*. 4 pages, numéro 111, juin 2006, disponible sur le site de l'IFEN, <http://www.ifen.fr>.

DUGUET, Jean-Pierre. *Cours « Traitement des eaux »*, 2007.

DURAND, Cédric. *Caractérisation physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial*, Université de Poitiers, octobre 2003, 268 p.

FASQUEL, Jean-Jacques. Blog *Développement durable et communication*. <http://jffasquel.blogspot.com/>

GOUSAILLES, Michel. SIAAP, DRD. Entrevue du 17 septembre 2008.

GREBAR (Groupe de REflexion sur la gestion des BArrages Réservoirs), *Compte rendu de la réunion n°31 du 23 novembre 1993*.

GREBAR (Groupe de REflexion sur la gestion des BArrages Réservoirs), *L'élaboration du SDAGE Seine-Normandie -- Premières réflexions du GREBAR : anoxie et eutrophisation*, mars 1994.

IFEN, *L'économie de l'environnement en 2006 – Rapport général*. Juin 2008. 133 p.

KANSO, Assem. *Évaluation des modèles de calcul des flux polluants des rejets urbains par temps de pluie*. Thèse de doctorat, ENPC – Marne-la-Vallée. 2004.

KELLER, Fabienne. *Rapport d'information du Sénat n°352 de 2006-2007 sur la politique de l'eau – La France au milieu du gué*.

LACOUR, Céline. CEREVE, étudiante en thèse. Entrevue du 25 avril 2008.

- LAGRABE, Dominique. DDE de l'Essonne, Police de l'eau. Entrevue du 12 novembre 2007.
- LARSEN, T. A., LIENERT, J., *Novaquatis final report. NoMix – A new approach to urban water management*. Eawag, 8600 Duebendorf, Switzerland. March 2007. Disponible sur le site de Novaquatis, <http://www.novaquatis.eawag.ch>
- LARSEN, T. A., LIENERT, J., *Soft paths in wastewater management – the pros and cons of urine source separation*. GAIA, 16/4 (2007). pp. 280-288
- LEGRUEL, Sébastien. SIAAP, DDX. Entrevue du 26 mars 2008.
- MEDD (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable). *Bilan des états des lieux des bassins hydrographiques*. Décembre 2004.
- MOUCHEL, Jean-Marie. Université de Jussieu. Entrevue du 21 mai 2008.
- MUSÉE des Égouts, Paris, visité début 2008.
- NEWater, <http://www.pub.gov.sg/newater>
- PAFFONI, Catherine. *Note sur la réactualisation du bulletin d'oxygène dissous en Seine*. SIAAP, DRD. Octobre 2005.
- PAFFONI, Catherine. SIAAP, DRD. Entrevue du 17 septembre 2008.
- OPUR. Programme de recherche. <http://www.enpc.fr/cereve/opur>
- POULIN, Michel. Mines de Paris. Entrevues du 21 mai et du 30 juillet 2008.
- QUEMENER, Jean-Marie. Service Navigation de la Seine, chef de la subdivision qualité et police de l'eau. Entrevue du 21 décembre 2007.
- RAKEDJIAN, Bruno. MEEDDAT, Direction de l'eau. Entrevue du 28 février 2008.
- ROSEMARIN, A., KVARNSTRÖM, E., SUBBARAMAN, M., et al. *Ecosan systems that accomodate anal washing*. Sustainable Water Management 2-2007. Universitätsdruckerei Klampfer, 8160 Weiz, Austria. pp. 9-14
- ROSEMARIN, A., JUN, X., WINBALD, U., et al. *Sweden-China Erdos Eco-town project, Dongsheng, Inner Mongolia*. EcoSanRes factsheet 11. May 2008.  
URL : [http://www.ecosanres.org/pdf\\_files/ESR-factsheet-11.pdf](http://www.ecosanres.org/pdf_files/ESR-factsheet-11.pdf)
- SIAAP, DRD. *Bilan 2007 de la qualité de la Seine et de la Marne*. Mars 2008. 55 p.
- SIAAP. Phase 1 : État des lieux. *Étude d'actualisation du schéma d'assainissement de la zone centrale de la région Île-de-France*. 2004.
- SIAAP. Phase 2 : élaboration de variantes au scénario C, simulations ProSe temps sec et temps de pluie. *Étude d'actualisation du schéma d'assainissement de la zone centrale de la région Île-de-France*. Janvier 2007.
- SIAAP. *Réalisation de simulations ProSe – année de référence 2003*. Juin 2006.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées – Projet de fin d'Etudes

SIAAP-Agence de l'eau Seine Normandie (AESN). *L'assainissement de l'agglomération parisienne : d'une indispensable démarche hygiéniste à une approche de protection de l'environnement*. Mars 2006.

TABUCHI, Jean-Pierre. AESN, Direction des collectivités. Entrevue du 26 mars 2008.

TASSIN, Bruno. CERREVE, Directeur. Entrevue du 25 avril 2008.

WICKER, Alain. *Cours « Déchets et sites pollués »*, 2007.