APPRECIATION DE L'IMPACT DES DEVERSEMENTS DE TEMPS DE PLUIE EN REGION PARISIENNE A L'AIDE DU MODELE MATHEMATIQUE KALPLAN

P. DEGARDIN *, G. BUJON **

* Agence de l'Eau Seine-Normandie

** Compagnie Générale des Eaux, détaché à l'Agence de l'Eau Seine-Normandie

RESUME

La réduction de la pollution des rejets urbains par temps de pluie se heurte à une première difficulté : la définition du niveau de traitement à atteindre pour préserver le milieu naturel. Des outils de simulation mathématique, tels que le logiciel KALPLAN (KALPLAN développé conjointement par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, Le Syndicat des Eaux d'Ile-de-France et la Compagnie Générale des Eaux) permettent d'obtenir rapidement des conclusions concernant cet impact et les hypothèses de traitement à mettre œuvre.

Les potentialités de l'outil KALPLAN, modèle de qualité de rivière, sont illustrées par la synthèse des simulations effectuées par l'Agence de l'Eau pour le compte du S.I.A.A.P. dans le cadre de trois opérations : l'étude de définition, d'un traitement des eaux excédentaires à Clichy, l'étude de l'impact sur la Seine de la future station d'épuration de Colombes et enfin, le schéma directeur d'assainissement de l'agglomération parisienne.

1. INTRODUCTION

La quantification de la pollution des rejets urbains de temps de pluie, conjonction de facteurs de nature différente (pluie, caractéristiques du bassin versant, réseau d'assainissement) est particulièrement délicate. L'appréciation de l'impact de ces rejets relève d'une difficulté supérieure encore, car s'ajoutent les facteurs qui régissent la capacité de réaction du milieu récepteur (conditions hydrauliques, qualité, température).

Les mesures sur le milieu naturel, très utiles au demeurant, présentent un certain nombre de contraintes pour apprécier ces impacts. En outre, cette approche peut se révéler insuffisante lorsqu'il s'agit de prévoir les conséquences d'aménagements projetés.

La modélisation mathématique peut ici être un complément de la mesure réellement utile. Les progrès de l'informatique, et notamment de l'informatique individuelle, permettent maintenant de disposer d'outils de simulation qui apportent rapidement des éléments d'aide à la décision. Les maîtres d'ouvrage sont en mesure de tester plusieurs scénarios d'aménagements, de les comparer et d'estimer s'ils sont adaptés aux objectifs qu'ils se sont fixés. Bien entendu, la modélisation mathématique n'est pas la panacée, elle a ses limites et de grandes incertitudes demeurent. Celles-ci sont notamment liées à l'état actuel des connaissances, car les modèles mathématiques en sont le reflet et ne peuvent restituer que les concepts à la base de leur élaboration.

Les possibilités offertes sont illustrées ici par le modèle de qualité de rivière KALPLAN (développé conjointement par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, le Syndicat des Eaux d'Ile-de-France et la Compagnie Générale des Eaux). KALPLAN a été élaboré pour simuler les effets de l'impact que l'on qualifie d'immédiat c'est-à-dire l'effet de choc. KALPLAN a été utilisé dans un cadre opérationnel en région parisienne, notamment pour le compte du Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (S.I.A.A.P.).

2. CARACTERISTIQUES GENERALES DU MODELE KALPLAN

2.1. FONCTIONNALITES

KALPLAN est un modèle mathématique de qualité de rivière qui a été développé pour apprécier l'impact de rejets permanents ou temporaires, pluviaux notamment, sur les indicateurs classiques de pollution des cours d'eau ; concentrations en :

- demande biochimique d'oxygène en 5 jours (DBO5), parties soluble (ou pseudo-soluble) et décantable,
- l'ammonium (NH_4^+),
- l'oxygène dissous (O_2),
- les nitrates (NO_3^-),
- les matières en suspension (MES), parties décantable et non-décantable.

Pour les caractéristiques susceptibles de décantation, les concentrations sont des moyennes sur la hauteur d'eau.

La simulation étant bidimensionnelle (longitudinale et transversale), le modèle est applicable à des cours d'eau de grande largeur, la Seine par exemple.

Les rejets, en nombre quelconque, peuvent être permanents ou temporaires ; le modèle accepte des variations de débit et de concentration qu'il suffit de préciser lors de l'entrée des données.

Le modèle tient compte des phénomènes de biodégradation et aussi de décantation qui peuvent influencer sur les concentrations de DBO5 ou de matières en suspension. Les phénomènes de remise en suspension ne sont pas simulés car le domaine d'emploi du modèle se situe pratiquement toujours dans des conditions de faibles débits.

Le modèle simule la plupart des particularités rencontrées dans les cours d'eau, les changements de section (largeur et profondeur), les confluences, les barrages et l'existence des îles.

2.2. CALAGE ET VALIDATION DU MODELE

On peut distinguer deux sortes de coefficients parmi ceux devant faire l'objet d'un calage :

- les coefficients de dispersion longitudinale, transversale et le gradient transversal des vitesses, qui sont de nature essentiellement hydraulique ;
- les coefficients de biodégradation ou de réaération qui sont de nature biochimique. Les coefficients de la loi de GAMESON (réoxygénation au niveau d'un barrage de navigation) font également partie de ce second groupe.

Pour des raisons de commodité, ces deux séries de coefficient ont été calés séparément.

Les coefficients « biochimiques » et ceux de la loi de GAMESON ont été calés grâce à un modèle de qualité plus simple que KALPLAN, le modèle KALITO qui est monodimensionnel, en régime permanent et qui simule la biodégradation et la réaération selon les mêmes lois que KALPLAN.

Le calage a été fait pour la Seine entre Montereau et Poses. Les données nécessaires proviennent des mesures sur plusieurs années du réseau national de bassin.

Les coefficients « hydrauliques » ont pu être calés grâce à des résultats de traçage à la rhodamine effectués en Seine, à l'amont de la confluence de la Marne et pour différents débits. Les traçages ont été réalisés, par la Compagnie Générale des Eaux, dans le cadre d'une étude des pollutions accidentelles susceptibles de perturber l'alimentation en eau potable de l'agglomération parisienne.

La morphologie du fleuve à l'aval de la confluence avec la Marne étant semblable à celle à l'amont, on peut supposer sans

grand risque que les valeurs des coefficients sont peu différentes dans les deux régions considérées.

Le modèle a fait l'objet d'une première validation en 1988, grâce à une campagne de mesure effectuée en Seine entre Choisy-le-Roi et Ivry-sur-Seine.

Au cours de cette campagne, un débit d'eau usée urbaine de 0,5 à 0,7 m³/s environ a pu être déversé en rive gauche du fleuve pendant quelques heures.

La qualité de l'eau du fleuve a été suivie par des prélèvements en Seine au niveau de 4 profils transversaux successifs de l'amont à l'aval.

Les dosages effectués sur ces prélèvements ont permis de vérifier une concordance très satisfaisante entre les résultats des mesures et ceux du modèle mathématique.

3. IMPACT DES DEVERSEMENTS D'EAUX PLUVIALES EN REGION PARISIENNE

Nous nous attacherons à développer l'aspect méthodologique pour mettre en lumière les potentialités de l'outil de simulation. Il ne s'agit donc pas traiter ici des orientations du S.I.A.A.P. en matière d'assainissement des eaux usées ou pluviales.

3.1. CADRE DE L'ETUDE

Au cours de la période juillet 1991 — juillet 1992, le S.I.A.A.P. a sollicité l'aide de l'Agence pour la réalisation de simulations à l'aide du logiciel KALPLAN dans le cadre de trois opérations (cf. figure 1 : plan de situation générale) :

- étude de définition d'un traitement des eaux excédentaires à Clichy ;
- étude d'impact de la future station d'épuration de Colombes ;
- schéma Directeur d'assainissement de l'agglomération parisienne :
 - étude d'impact sur la Seine par temps de pluie à l'aval Paris,
 - étude d'impact sur la Marne de la station d'épuration de Noisy-le-Grand

Les travaux de simulations ont été menés pour le compte du S.I.A.A.P. en collaboration avec les bureaux d'études chargés des différents sujets, HYDRATEC et PROLOG-Ingénierie qui ont défini les hypothèses et exploité les résultats.

3.2. ETUDE DE DEFINITION D'UN TRAITEMENT DES EAUX EXCEDENTAIRES A CLICHY

L'objectif du S.I.A.A.P. était d'éviter les mortalités piscicoles en Seine (pour des conditions de débit voisines de 100 m³/s et une température de 20 °C) pour un orage analogue à celui du 27 juin 1990, choisi comme événement de référence. L'impact sur les populations piscicoles est évalué à travers l'évolution de l'oxygène dissous.

Trois hypothèses ont été simulées :

- la situation actuelle sans traitement,
- la situation future proche (traitement des eaux excédentaires de l'usine de Clichy seule pour un orage type 27 juin 1990),
- et la situation future maximaliste (traitement de tous les rejets de temps de pluie) pour une qualité de Seine actuelle et une qualité de Seine améliorée.

Les simulations avaient pour but d'estimer l'impact des rejets, traités ou non, les temps de propagation, les interférences éventuelles entre les rejets, l'impact d'une pluie moins forte mais plus longue que celle du 27 juin 1990. Elles visaient également à étudier l'intérêt de dispositifs d'oxygénation ponctuels en Seine.

Pour les besoins de l'étude, deux tronçons de Seine ont été simulés : de Clichy à l'extrémité de l'île de Chatou (soit 25,7 km) et de Boulogne-Billancourt à Clichy (soit 11,7 km). La Seine est représentée avec un débit de 100 m³/s, une température de 20 °C et une qualité limite entre les classes 1B et 2.

Les rejets sont agglomérés en secteurs de rejets. La pollution rejetée est issue des mesures du SIAAP pour le site de Clichy et d'une simulation des charges pluviales pour les autres rejets (modèle d'HYDRATEC avec une pluie quinquennale uniforme). La pluie du 27 juin 1990 est estimée avoir une fréquence de retour de 5 ans en lame d'eau moyenne (25 ans dans la zone la plus intense) mais 1 à 2 ans en terme de débit déversé (probablement davantage en terme de pollution déversée).

Figure 1 : Plan de situation générale.

On a pu vérifier la légitimité de l'approche par la bonne concordance des mesures existantes et des prédictions du modèle sur la situation du 27 juin 1990.

Les simulations ont tout d'abord mis en évidence l'impact du déversoir d'orage de Clichy sur la Seine supposé seul. On suit ainsi l'évolution de la tâche de pollution au fil de l'eau jusqu'au mélange transversal (cf. figure 2).

La consommation de l'oxygène dissous due à la dégradation de la matière organique est telle que l'on atteint l'anoxie quasi complète sur toute la largeur en certaines sections du fleuve.

L'anoxie est très courte à Bougival et absente à Chatou. La

confrontation du rejet de Clichy aux autres rejets du bief Clichy — Chatou/Bougival met en évidence une interaction forte des tâches de pollution en amont de l'île de Chatou laquelle aggrave l'anoxie qui se propage jusqu'aux barrages. Les anoxies doivent être appréciées en fonction de deux critères aggravants : la durée et l'uniformité d'une rive à l'autre.

La simulation bidimensionnelle des paramètres caractéristiques de la pollution permet de suivre l'évolution de la nappe de pollution (cf. figure 3 : évolution de l'oxygène dissous en Seine en amont de l'île de Chatou et figure 4 : évolution de la DBO5 en Seine au barrage de Bougival).

Figure 2 : Propagation du pic de pollution de Clichy supposé seul.

Figure 3 : Evolution de l'oxygène dissous en Seine en amont de l'île de Chatou.

Figure 4 : évolution de la DBO5 en Seine au barrage de Bougival.

La simulation apporte des enseignements particulièrement utiles sur :

- les temps de propagation des nappes de pollution et leur durée ;
- l'extension spatiale (emprise sur la largeur du cours grandissante au fil du temps et au gré des îles, étendue longitudinale) ;
- l'évolution dans le temps et dans l'espace de la qualité du cours d'eau, et par là-même le degré de gravité de la pollution ainsi que le temps nécessaire pour recouvrer les conditions initiales ;
- les mécanismes qui engendrent les mortalités piscicoles. La zone d'anoxie diffuse, se propage et s'étend progressivement à toute la largeur du cours d'eau. Ce bouchon anoxique constitué se dégrade peu à peu (les mécanismes compensateurs de réoxygénation sont relativement lents), mais poursuit inexorablement sa progression chassant les poissons vers l'aval. Ces derniers, ne sachant franchir les barrages de navigation, succombent principalement par étouffement lorsque la zone d'anoxie qui s'abat sur eux se prolonge trop longtemps (quelques heures).

Une simulation des rejets en amont de Clichy a permis de vérifier que le rejet du Ru de Marivel arrive très atténué au niveau de Clichy et que les risques d'interférence des rejets principaux en rive gauche des Hauts-de-Seine avec celui de Clichy sont faibles.

3.2.1. Influence du traitement des rejets

Les hypothèses de traitement montrent une réduction importante de la pollution dans la Seine. On constate surtout l'intérêt de traiter la totalité des rejets (principaux) car un traitement à Clichy seul ne fait qu'atténuer légèrement les anoxies.

Le traitement de tous les rejets permet une réduction importante de la durée des anoxies mais sans aboutir à leur suppression totale pour un événement du type 27 juin 1990.

Une bonne qualité de temps sec de la Seine favorise une meilleure capacité d'absorption des chocs de pollution.

Les simulations ont également permis de tester l'impact de dispositifs de réoxygénation en Seine. L'injection ponctuelle d'eau oxygénée lors du passage de la nappe de pollution procure une zone de survie de 25 m de large environ sur une longueur de quelques centaines de mètres. Le dispositif semble prometteur (sous réserve de sa faisabilité technique) et intervient en réelle complémentarité avec un traitement sur site des rejets.

3.3. IMPACT DE LA FUTURE STATION D'EPURATION DE COLOMBES

Plusieurs simulations ont été effectuées en vue d'apprécier l'impact de la future station de Colombes (prévue pour traiter une partie des eaux pluviales) sur la qualité des eaux de Seine par temps de pluie.

Ces simulations avaient notamment pour but d'examiner les conséquences d'un rejet en rive gauche ou droite de cette station et de définir dans les deux cas, l'importance et la gravité des zones d'anoxie éventuelles par temps de pluie à l'aval.

Très brièvement, la Seine d'un débit de 60 à 80 m³/s recevait en rive gauche les rejets des secteurs de Gennevilliers et de Nanterre et en rive droite ceux d'Argenteuil et de Chatou ; les rejets de la station de Colombes étaient déversés soit en rive gauche, soit en rive droite. Dans tous les cas, ces rejets étaient bien entendu variables en cours de pluie tant en débit qu'en qualité.

L'impact de ces déversements a été simulé du Pont d'Argenteuil jusqu'à la prise d'eau du Pecq, soit sur une longueur moyenne de 17 km environ. Sur ce parcours, où le cours de la Seine rencontre l'île de Chatou, la modélisation a permis de déterminer la répartition de la pollution dans les deux branches du cours d'eau et d'apprécier dans chacune d'elles l'influence des barrages de Chatou et Bougival.

Les simulations ont montré que le déversement en rive gauche de la station de Colombes entraînerait une dégradation de qualité très importante de la branche gauche de l'île de Chatou, dont le débit est généralement beaucoup plus faible que celui de la branche droite.

Le rejet en rive droite aurait pour conséquence une dégradation tolérable de la branche droite de la Seine. La branche gauche serait pratiquement épargnée par ce rejet, mais les déversements du secteur de Nanterre dégraderaient suffisamment les eaux transitant par cette branche pour voir apparaître quelques zones d'anoxie temporaire.

3.4. SCHEMA DIRECTEUR D'ASSAINISSEMENT DE L'AGGLOMERATION PARISIENNE

3.4.1. Etude d'impact sur la Seine par temps de pluie à l'aval de Paris

Les simulations effectuées dans le cadre du schéma directeur d'assainissement de la région parisienne avaient pour but d'ap-

précier l'impact des rejets de temps de pluie, à l'aval immédiat de l'agglomération.

La zone d'étude s'étendait sur une trentaine de kilomètres entre la confluence du Ru de Marivel et les barrages de Bougival et de Chatou (situés respectivement sur les branches gauche et droite de part et d'autre de l'île de Chatou).

Très brièvement, dix rejets correspondant au regroupement de plusieurs rejets d'importance moindre ont été pris en compte. Certains de ces rejets étaient supposés prétraités ; c'est le cas des rejets de Clichy, La Plaine-St-Denis et La Briche. Le rejet de Clichy était de plus reporté en rive gauche pour tenter d'équilibrer transversalement la pollution dans l'eau du fleuve.

Le débit de la Seine a été fixé à 75 m³/s (condition d'étiage) et la température de l'eau à 23 °C.

L'examen des résultats de simulation révèle les points suivants.

Les bras gauche et droit de l'île Saint-Denis sont soumis par temps de pluie à des chocs de pollution très importants caractérisés par une zone d'anoxie dans chaque cas. Le souci de porter le rejet de Clichy en rive gauche de Seine ne se traduit donc pas par une amélioration du bras droit très pollué par ailleurs. En revanche, il a pour résultat de polluer sévèrement le bras gauche qui, sans cela, pourrait constituer un îlot de survie pour la faune aquatique. Il est donc préférable de maintenir le rejet de Clichy en rive droite.

Les rejets les plus importants, de Clichy, la Plaine-Saint-Denis et de La Briche, bien que traités, ont une influence néfaste relativement loin à l'aval, jusqu'à l'île de Chatou où ils provoquent encore des zones d'anoxie.

Afin d'éviter à terme ces zones anoxiques lors du passage des pollutions déversées à l'amont, il sera nécessaire, outre un traitement, de mettre en œuvre une régulation de ces déversements de manière à limiter les flux rejetés et à optimiser la capacité du fleuve à les accepter.

3.4.2. Impact sur la Marne de la Station d'épuration de Noisy-le-Grand

Les simulations ont eu pour objectif d'évaluer l'impact de la station de Noisy-le-Grand par temps sec et pluvieux sur la qualité de la Marne, entre son lieu de rejet, en rive gauche de l'île de Pisse-Vinaigre, et le barrage de Créteil.

Les simulations ont été effectuées pour deux situations de rejets (1991 et 1993) avec des niveaux de traitement différents et deux températures d'eau de Marne (12 °C et 23 °C). Les conditions de rejet par temps de pluie correspondaient à une pluie de fréquence décennale.

Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de différence notable, par temps sec ou pluvieux, entre les deux scénarios étudiés.

Des zones d'anoxies, sans commune mesure avec ce que l'on peut observer à l'aval de Paris, apparaissent dans chaque bief d'étude au passage de la vague polluante provoquée par la pluie, le bief le plus critique étant bien sûr celui du bras gauche de l'île de Pisse-Vinaigre.

4. CONCLUSION

Les applications montrent l'intérêt d'outils de simulations mathématiques tel KALPLAN pour apporter rapidement des éléments de réponse sur l'impact des rejets de temps de pluie.

Les simulations ont confirmé l'importance de cette pollution à l'aval de Paris et mis en évidence la nécessité d'agir sur l'ensemble des principaux rejets (approche globale). Une action limitée à l'un d'entre eux risque de se révéler insuffisante.

Une autre utilisation prospective du logiciel KALPLAN est de

réaliser des simulations en vue de définir une ébauche (« théorique ») de politique d'objectifs de qualité par temps de pluie. L'Agence de l'Eau Seine-Normandie y travaille actuellement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. BUJON — Description du modèle KALPLAN. Document provisoire du séminaire « Pollution des rejets urbains de temps de pluie », Sénat, mars 1992.
- [2] F. VALIRON et J.-P. TABUCHI — Maîtrise de la pollution urbaine par temps de pluie : état de l'art. 1992, pp. 503-511.
- [3] A. LESOUF et A. ANDRE — Mise au point d'un modèle de qualité de la Seine de Montereau à Poses. Société Hydrotechnique de France, Nantes, septembre 1982.
- [4] S.I.A.A.P. — Etude de définition d'un traitement des eaux excédentaires par temps de pluie à l'usine de Clichy : exploitation des données et diagnostics (rapport de synthèse — partie n° 2). SETEC, SETUDE et SAFEGE, novembre 1991, pp. 18.

DISCUSSION

M Jean-Marie LAFOND (CEMAGREF Lyon — ENGEES Strasbourg)

M DEGARDIN, si l'un des buts de votre travail était d'évaluer la mortalité piscicole, j'aurais voulu savoir s'il n'était pas nécessaire, lors de la modélisation avec KALPLAN, d'avoir la dimension verticale de la concentration en O₂, du fait de la stratification de ce gaz dans la rivière ?

M DEGARDIN

L'objectif n'était pas de simuler les mortalités piscicoles, mais bien les paramètres de qualité. La concentration en oxygène dissous est supposée homogène sur toute la section verticale dans le modèle. Des mesures ont été faites et M MOUCHEL pourrait apporter des éléments d'information sur le sujet. On peut parfaitement la considérer comme globalement homogène, au moins sur une approche telle que celle que l'on a développée.

M GOUSAILLE (SIAAP)

Chaque fois que des mesures d'oxygène dissous ont été faites sur la Seine dans des conditions difficiles, on n'a jamais trouvé de gradient de concentration dans la hauteur du fleuve. La Seine fait 200 m de large et seulement 4 m de hauteur : cela est donc extrêmement plat. On ne relève pas de grande variations, à part peut-être, dans les derniers centimètres vers le bas et dans les 10 ou 15 cm vers le haut. Mais à part cela, c'est tout à fait homogène.

M Guy JACQUET (RHEA)

Si j'ai bien compris, le modèle KALPLAN sert à définir un certain nombre d'aménagements. Je ne comprends donc pas très bien l'intérêt de mettre en place un dispositif de réoxygénation des eaux, alors que j'ai entendu dire que la cause de mortalité piscicole n'était pas seulement liée à la désoxygénation, mais qu'il existe des problèmes de toxicité aiguë sur la rivière, comme M ALLARDI et les gens du CEMAGREF l'ont montré tout à l'heure. J'aimerais donc savoir si, à la suite de ces exposés, vous allez maintenir les dispositifs de réoxygénation ?

M GOUSAILLES (S.I.A.A.P.)

Avant de répondre à la question, j'aimerais apporter une petite précision. A l'heure actuelle, en ce qui concerne l'agglomé-

DISCUSSION

ration parisienne, qu'il pleuve, qu'il vente, qu'il neige ou qu'il fasse beau, la quantité d'ammoniaque rejetée à la rivière est à peu près constante, car la station d'épuration ne traite pas spécifiquement l'ammoniaque. Quand il pleut, la seule différence est que l'ammoniaque n'est pas rejeté au même endroit, au droit de la station d'épuration d'Achères, mais au droit de tous les déversoirs d'orage. Les concentrations d'ammoniaque ne peuvent donc pas subir de variations considérables à l'aval d'Achères. Par contre à l'amont, il est évident qu'en temps normal, nous n'avons pas de déversement, donc des teneurs en ammoniaque très faibles, mais qui augmentent brutalement lors des déversements par temps de pluie : en amont de Clichy, à la Briche.

Maintenant, en ce qui concerne le maintien des îlots de survie, la réponse est oui et complètement oui. Je n'ai pas appris aujourd'hui que l'absence d'oxygène était favorable à la survie des poissons. Je ne vois donc pas pourquoi on arrêterait le programme qui consiste à créer localement, dans des situations de crise uniquement, des zones où on espère remonter la teneur en O₂ de quelques mg/l.

M René LAVARDE (Agence de l'Eau Artois-Picardie)

Pour expliquer le déficit important en oxygène par temps de pluie, est-ce que l'on ne pourrait pas, outre l'aspect diminution de la photosynthèse par moindre luminosité et l'impact de la consommation immédiate d'oxygène par la DBO, ajouter aussi l'augmentation de la turbidité de la Seine, liée à la remise en suspension des vases ?

M MOUCHEL

On a fait quelques mesures sur la Seine durant l'été 1992, après les pluies du 1er juillet et du 31 août qui ont donné lieu à de forts rejets. On est passé de l'ordre de 8 à 10 mg/l de MES à 12 ou 15, ce qui n'est pas très important. Peut être que lors d'un rejet vraiment fort, comme après la grosse pluie du 27 juin 1990, il pourrait en effet y avoir une valeur de turbidité élevée. Mais pour des pluies moindres, avec des rejets de l'ordre 300 à 500 m³, nous n'avons pas observé de phénomènes de ce type.

Inde : jour de Mousson (photothèque EDF).