

sisippa 89

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED APPROACHES
TO WATER POLLUTION PROBLEMS
SYMPOSIUM INTERNATIONAL SUR DES SOLUTIONS INTÉGRÉES
POUR DES PROBLÈMES DE POLLUTION DE L'EAU
SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SOLUÇÕES INTEGRADAS
PARA PROBLEMAS DE POLUIÇÃO DA ÁGUA

GESTION INTÉGRÉE DES EAUX RÉSIDUAIRES D'UN BASSIN FLUVIAL : LE CAS DU TAGE

INTEGRATED WASTEWATER MANAGEMENT IN A RIVER BASIN : THE TAGUS CASE

GESTÃO INTEGRADA DAS AGUAS RESIDUAIS DE UMA BACIA HIDROGRAFICA : O CASO DA BACIA DO TEJO

Daniel TYTECA⁽¹⁾

ABSTRACT

A model is elaborated, with the goal of planning the treatment degrees to be achieved in a set of plants receiving wastewaters from a basin, such that quality standards at various points of the rivers in the basin are satisfied, and in such a way that the total discounted treatment costs be minimized. Results obtained on two parts of the Tagus basin indicate that (1) applying the model to rivers with moderate flow rate, rather strongly polluted (Rio Nabão basin), is relevant; (2) by contrast, the use of the model for large rivers with high flow rate, not too heavily polluted (main course of the Tagus) is less relevant, due to the important self-purification capacity of the river. It is also concluded that the previous or at least simultaneous use of an optimal treatment plant location model is to be strongly recommended, for technical and economical effectiveness reasons.

Key words: river quality modeling, wastewater treatment planning, treatment cost, Tagus.

RESUMO

Apresenta-se um modelo cuja finalidade é a de planificar os graus de tratamento a proporcionar pelo conjunto das estações de tratamento que recebem as águas residuais de uma bacia, de forma a respeitar as normas de qualidade impostas em diversos pontos dos cursos de água dessa bacia e a minimizar a soma dos custos actualizados do tratamento. Os resultados obtidos em duas zonas da bacia do Tejo indicam que : (1) é pertinente a aplicação do modelo a cursos de água de pequeno caudal mediantemente ou fortemente poluídos (caso do rio Nabão); (2) por outro lado, oferece menos interesse a utilização do modelo em cursos de água de grande caudal e relativamente pouco poluídos (caso do trecho principal do Tejo), dada a sua grande capacidade de autodepuração. Ressalta ainda dos resultados obtidos que a aplicação prévia ou pelo menos simultânea de um modelo de localização óptima de estações de tratamento é fortemente aconselhável por razões de eficiência técnica e económica.

⁽¹⁾ Ingénieur civil, Docteur en Sciences naturelles appliquées, Chef de Travaux à l'Institut d'Administration et de Gestion, Université Catholique de Louvain, Avenue de l'Espinet 16, B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique)

1 - INTRODUCTION

La gestion régionale du traitement des eaux résiduaires s'efforce de trouver les solutions les plus économiques garantissant à l'environnement aquatique un niveau de qualité compatible avec la réalisation de divers objectifs. Elle peut faire appel à trois grands types de modèles mathématiques d'optimisation :

- Le modèle de localisation de stations d'épuration, dont le but est de rechercher, dans une région donnée, le tracé et le dimensionnement de collecteurs destinés à recueillir l'ensemble des eaux résiduaires, ainsi que le nombre, la localisation et la taille de stations d'épuration permettant de traiter ces mêmes eaux résiduaires avant leur rejet à des cours d'eau récepteurs. La qualité des cours d'eau n'est ici pas prise explicitement en considération et les stations d'épuration sont toutes supposées effectuer le même type de traitement (p. ex. SMEERS et TYTECA 1983).
- Le modèle de planification des degrés de traitement, qui permet de calculer la combinaison optimale des degrés de traitement à réaliser en un certain nombre de stations d'épuration localisées le long des cours d'eau d'un bassin. Ici, l'emplacement des stations est connu de même que leur débit entrant d'eaux résiduaires; par contre on tient compte explicitement de la qualité des cours d'eau récepteurs pour lesquels des objectifs de qualité sont formulés (p. ex. ECKER 1975).
- Le modèle global, réalisant simultanément les opérations des deux autres types de modèles : en particulier, on détermine le nombre, la localisation, la taille et le degré de traitement des stations d'épuration à mettre en œuvre (p. ex. SMEERS et TYTECA 1982, 1985).

Cette communication a pour objet l'application d'un modèle du deuxième type (planification des degrés de traitement) à deux parties du bassin du Tage : le bassin du Rio Nabão, affluent secondaire du Tage (Fig. 1), et la partie la plus importante du cours principal du Tage avec quelques affluents directs (Fig. 2). Ces recherches ont été poursuivies sous l'égide de l'UNESCO (Rio Nabão : TYTECA 1984) et de l'O.M.S. (Tage : TYTECA 1986), avec la collaboration des membres de la Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamento Hidráulicos du Ministère de l'Équipement Social portugais (Lisbonne).

2 - MODELE DE PLANIFICATION DES DEGRES DE TRAITEMENT DES EAUX RESIDUAIRES DANS UN BASSIN DE RIVIERE

La présentation qui suit est très succincte. Le lecteur intéressé trouvera un exposé plus détaillé du modèle dans un des rapports susmentionnés (TYTECA 1984) ou dans la littérature (voir p. ex. ECKER 1975).

Le modèle de planification a pour objet de spécifier le degré de traitement à réaliser en différents points de rejet d'eaux résiduaires répartis le long des cours d'eau d'un bassin, de façon à respecter des objectifs de qualité formulés pour le bassin, et ce au coût global de traitement le plus bas possible. Plus précisément, la qualité des cours d'eau est décrite, dans l'état actuel de développement du modèle, par deux paramètres de concentration : la demande biochimique en oxygène (DBO_5 , en abrégé B, en mg/l) et le déficit en oxygène dissous (DOD, en abrégé D, en mg/l). L'évolution de la qualité au cours de l'écoulement dans le bassin sera décrite par les variables et paramètres suivants :

B_b et D_b , respectivement la DBO_5 et le DOD au début des tronçons ("b" est mis pour "begin"; au début du tronçon d'indice i, on notera B_{bi} et D_{bi});

B_e et D_e , respectivement la DBO_5 et le DOD à la fin des tronçons ("e" est mis pour "end"; à la fin du tronçon i, on notera B_{ei} et D_{ei});

B_w , la concentration en DBO_5 dans l'effluent des points de rejet d'eaux résiduaires, éventuellement après épuration ("w" pour "waste"; la DBO_5 rejetée au point j sera notée B_{wj});

Q, les débits volumétriques des tronçons et des rejets (en m^3/sec ; on notera Q_i pour le tronçon i et Q_j pour le rejet j).

Ces différents paramètres et variables sont gouvernés par deux types d'équations :

- Des équations d'équilibre des débits massiques : les débits massiques de DBO et de DOD en un point de rivière suivant un confluent ou un rejet d'eaux résiduaires sont égaux à la somme des débits massiques d'amont. Par exemple, pour le point P de la Fig. 2 (confluent du Zêzere et du Tage), on aura :

$$B_{b8} Q_8 = B_{e4} Q_4 + B_{e7} Q_7 + B_{w8A} Q_{8A} + B_{w8B} Q_{8B} \quad (1)$$

$$D_{b8} Q_8 = D_{e4} Q_4 + D_{e7} Q_7 + D_{w8A} Q_{8A} + D_{w8B} Q_{8B} \quad (2)$$

- Des équations décrivant les phénomènes d'autoépuration observés dans les cours d'eau : par exemple, pour le tronçon 8 de la Fig. 2 (voir par exemple RINALDI *et al.* 1979a ou 1979b) :

$$B_{e8} = \left(B_{b8} - \frac{R}{K_1 + K_3} \right) e^{-(K_1 + K_3) t_8} + \frac{R}{K_1 + K_3} \quad (3)$$

$$D_{e8} = \frac{K_1}{K_2 - (K_1 + K_3)} \left[\left(B_{b8} - \frac{R}{K_1 + K_3} \right) (e^{-(K_1 + K_3) t_8} - e^{-K_2 t_8}) \right] + \frac{K_1}{K_2} \left(\frac{R}{K_1 + K_3} - \frac{A}{K_1} \right) (1 - e^{-K_2 t_8}) + D_{b8} e^{-K_2 t_8} \quad (4)$$

ou, en abrégé, compte tenu de ce que, généralement, $K_3 \approx R \approx A \approx 0$, et du fait que le temps de séjour t_8 est connu dès que le débit et la section du cours d'eau sont connus,

$$B_{e8} = \lambda_8 B_{b8} \quad (5)$$

$$D_{e8} = \mu_8 D_{b8} + \rho_8 B_{b8} \quad (6)$$

où λ_8 , μ_8 et ρ_8 sont des constantes calculées à partir des grandeurs apparaissant dans les équations (3) et (4).

Le modèle comporte donc autant d'équations de type (1), (2) qu'il y a de confluent et/ou de rejets d'eaux résiduaires, et autant d'équations de type (5), (6) qu'il y a de tronçons dans le bassin étudié. Les objectifs de qualité seront exprimés en spécifiant une borne ou limite supérieure à chacune des variables B_e , B_b , D_e , D_b . Notons ici que si on souhaite spécifier un objectif de qualité en un point situé au milieu d'un tronçon donné (et non plus seulement au début et à la fin de ce tronçon), le tronçon peut être divisé en deux sous-tronçons pour lesquels on écrira également des équations de type (5), (6). La situation se présente, à la Fig. 2, pour deux tronçons du Tage, partagés respectivement en les sous-tronçons 9 et 10 et en les sous-tronçons 13 et 14.

Les objectifs de qualité spécifiés pour les variables B_e , B_b , D_e , D_b pourront être atteints en agissant sur les seules variables indépendantes des équations précitées, à savoir les concentrations en DBO aux points de rejet, B_w . Réduire la valeur de ces concentrations implique un certain coût d'épuration (incluant des charges d'investissement et d'exploitation), que l'on exprime généralement par une fonction de la forme

$$C = \alpha (B_w)^\beta \quad (\beta < 0) \quad (7)$$

où le coefficient α traduit l'importance du débit et de la charge polluante initiale au point de rejet considéré. L'exposant β , négatif, indique que plus le degré de traitement est élevé, plus B_w est faible, plus le coût est élevé.

Le modèle ainsi présenté comporte une fonction objectif (fonction de coût, à minimiser) non-linéaire composée d'une somme d'expressions de la forme (7), et des contraintes linéaires de types (1), (2), (5) et (6). Ce modèle a été traité de façon très satisfaisante par le programme du

gradient réduit généralisé (GRG : voir ABADIE 1978), dont une esquisse générale et l'adaptation au modèle précité ont été présentées antérieurement (TYTECA 1984).

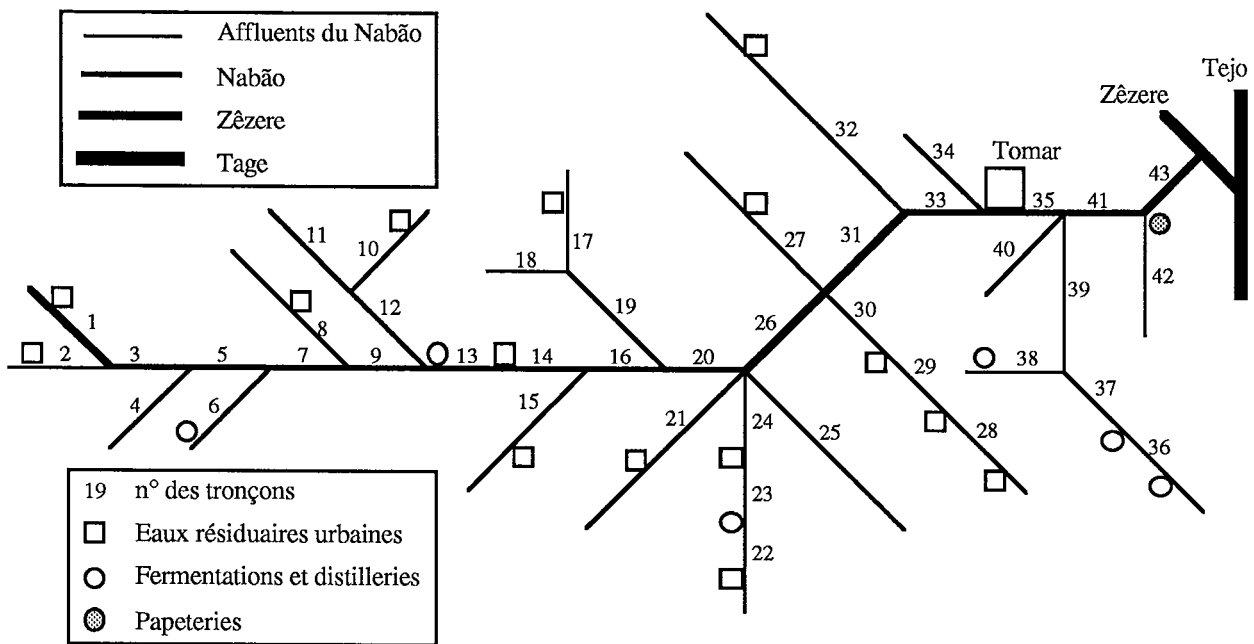


Fig. 1 - Le bassin du Rio Nabão, avec les tronçons de rivière et les points de rejet d'eaux résiduaires

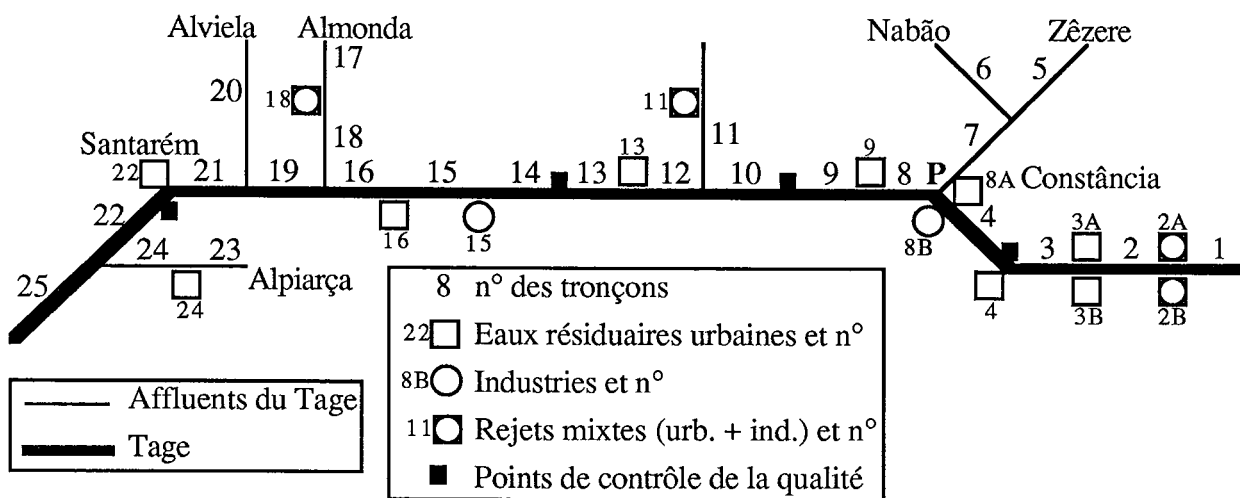


Fig. 2 - Le bassin du Tage, avec les tronçons de rivière et les points de rejet d'eaux résiduaires

3 - APPLICATIONS AU BASSIN DU TAGE

3.1 - Schémas hydrauliques

Le Rio Nabão est un affluent de rive droite du Rio Zêzere, lui-même affluent du Tage, mais la distance du confluent au Tage est très courte, de sorte que le Nabão puisse être considéré comme un affluent direct du Tage. Le bassin du Rio Nabão couvre environ 1000 km²; la principale agglomération en est Tomar. La Fig. 1 donne une représentation du bassin.

Le schéma hydraulique du Tage est illustré à la Fig. 2. L'attention s'est portée sur le cours principal du Tage, sur la portion comprise entre le barrage de Belver (en amont) et Vila Franca de Xira (en aval). Les cours supérieurs des affluents importants sont ici laissés de côté, bien qu'ils soient parfois nettement plus pollués que le Tage lui-même. De cette façon, les composantes de la qualité des affluents du Tage, en amont des rejets considérés (Fig. 2), apparaîtront comme paramètres extérieurs au modèle; les décisions à leur sujet seront donc considérées comme exogènes au modèle. Par conséquent, sur les 25 tronçons de la Fig. 2, seuls 18 doivent faire l'objet de décisions prises en compte dans le modèle, les 7 autres tronçons (1 : cours supérieur du Tage; 5, 6, 7, 17, 20 et 23 : cours supérieur des affluents importants) étant exogènes. Par ailleurs, les affluents mineurs, dont le débit est inférieur à 1/1000 de celui du Tage, ont été négligés à ce stade.

3.2 - Données disponibles et quantification du modèle

3.2.1 - Peu de données étaient disponibles pour la quantification des paramètres du modèle de rivière. Pour le Rio Nabão, les données utilisées proviennent de la littérature (p. ex. RINALDI *et al.* 1979). Pour le Tage, quelques données permettaient d'adopter les valeurs moyennes suivantes : $K_1 = 0,4 \text{ j}^{-1}$, $K_2 = 0,346 \text{ j}^{-1}$, $K_3 \approx 0$, $R \approx 0$ et $A \approx 0$. Les débits et températures des cours d'eau pris en considération sont ceux correspondant aux conditions les plus défavorables, c'est-à-dire en principe les débits d'étiage en situation estivale. Le détail des données utilisées est fourni dans les rapports d'étude (TYTECA 1984, 1986).

3.2.2 - Pour la quantification des rejets d'eaux résiduaires, les hypothèses suivantes ont notamment été formulées :

- Seules ont été prises en compte les industries à eaux usées aisément biodégradables, à savoir, pour la région étudiée, les industries textiles, les abattoirs, les industries alimentaires, les élevages de bétail, les papeteries, les usines de fermentation et distilleries. Les industries à eaux résiduaires non ou difficilement assimilables doivent faire l'objet d'une étude spécifique pour le traitement de leurs effluents.
- Seuls les rejets correspondant à des localités et/ou industries assimilables de plus de 1000 habitants ont été pris en considération.
- Les rejets d'eaux résiduaires considérés n'ont fait l'objet d'aucune analyse préalable de regroupement et/ou de localisation en vue d'un traitement commun éventuel. On a donc considéré chaque rejet individuellement comme étant l'exutoire naturel du réseau d'égouts de chaque localité desservie avec, le cas échéant, les industries qui y sont incluses.

3.2.3 - Les fonctions de coût utilisées, de la forme (7), ont été quantifiées sur base des données économiques locales disponibles. Elles englobent les coûts d'installation et une somme actualisée sur 20 ans des coûts d'exploitation. Les valeurs des paramètres α et β apparaissant dans l'équation (7) ont été calculées en fonction du volume et de la nature des eaux résiduaires à traiter. L'exposant β , négatif, est influencé essentiellement par la nature des eaux usées; à titre indicatif, les valeurs du Tableau 1 ont été proposées (TYTECA 1986).

Tableau 1 - Quelques valeurs adoptées pour l'exposant des fonctions de coût d'épuration

Type d'eaux usées	Valeur de β
Pâte à papier	- 0,815
Conserves de tomates	- 0,675 , - 0,795
Eaux urbaines domestiques	- 0,8 , - 0,4

3.3 - Mise en œuvre du modèle et résultats

La transcription du modèle sous forme de programme GRG a donné lieu à la formulation des problèmes mentionnés au Tableau 2 (tous à objectif non linéaire et contraintes linéaires). Les résultats les plus significatifs apparaissent aux Tableaux 3 et 4.

Tableau 2 - Caractéristiques des problèmes résolus

Problème	Nombre de variables	Nombre de contraintes d'égalité	Nombre de contraintes d'inégalité
I - Nabão, sous-bassin 1	70	31	26
II - Nabão, sous-bassin 2	47	18	19
III - Tage	79	36	28

Tableau 3 - Résultats obtenus pour le bassin du Rio Nabão ($\beta = - 0,4$)

Situation n°		1	2	3	4	réf.*
Critères de qualité	DBO sans captage	5	10	3	3	-
	DBO avec captage	3	4	3	2	-
	DOD sans captage	4,8	4,8	4,8	2,8	-
	DOD avec captage	2,8	3,8	2,8	1,8	-
Coût optimal total (millions d'escudos)		662,0	531,3	730,0	1131,4	730,5
DBO des rejets	Bw1	6,74	10,85	6,74	2,62	30
	Bw2	17,76	42,71	7,79	7,79	30
	Bw6	82,24	207,93	31,97	31,97	30
	Bw8	22,97	56,05	9,74	9,74	30
	Bw10	11,72	19,98	11,72	3,45	30
	Bw13	540	540	540	540	30
	Bw14	410,38	540	230,69	230,74	30
	Bw15	11,42	26,44	5,41	5,41	30
	Bw17	19,31	33,43	19,31	5,19	30
	Bw21	52,93	132,83	20,98	20,98	30
	Bw22	40,82	101,80	16,43	16,43	30
	Bw23	270,66	540	154,90	154,90	30
	Bw24	50,20	104,74	29,02	29,02	30
	Bw27	33,26	82,43	13,60	13,60	30
	Bw28	12,19	20,85	12,19	3,53	30
	Bw29	57,68	79,15	57,68	36,22	30
	Bw30	121,06	166,22	121,06	75,90	30
	Bw32	91,51	231,69	35,44	35,44	30
	Bw35	14,34	19,62	14,34	9,06	30
	Bw36	130,70	259,40	130,70	2,00	30
Bw37	333,45	458,05	333,45	208,85	30	
Bw38	13,54	25,08	13,54	2,00	30	
Bw43	533,72	540	533,72	345,78	30	

* tous les rejets épurés jusqu'à la DBO de 30 mg/l

Tableau 4 - Résultats obtenus pour le bassin du Tage (β suivant Tableau 1)

Situation	1		2	
Critères de qualité (mg/l)	DBO	5	3	
	DOD	4	2	
Coût optimal (millions d'esc)	1198,6		3034,4	
Rejet	DBO rejetée	% épuré	DBO rejetée	% épuré
2A	241,2	0	39,14	83,8
2B	583,8	0	116,3	80,1
3A	337,5	0	65,13	80,7
3B	143,3	0	26,77	81,3
4	400	0	80,81	79,8
8A	694,3	0	454,3	34,6
8B	450	0	417,5	7,22
9	168,8	0	168,8	0
11	5,36	98,7	2,04	99,5
13	384,2	0	374,2	2,60
15	202,5	0	202,5	0
16	400	0	400	0
18	5,00	97,6	1,156	99,5
22	337,5	0	337,5	0
24	5,00	98,8	1,310	99,7

Les quelques commentaires suivants peuvent être faits quant aux solutions obtenues. Pour le bassin du Rio Nabão, constitué de cours d'eau à débit moyen, moyennement à fortement pollués, la diversité des résultats présentés au Tableau 3 montre que l'application du modèle est tout à fait pertinente. On voit que dans de nombreux cas, et dans le cadre des hypothèses formulées, il n'est pas toujours requis d'épurer l'eau résiduaire jusqu'aux normes "standard" (30 mg/l de DBO), alors qu'en d'autres points, il est nécessaire d'épurer davantage les effluents que ne le requerrait l'adoption de normes standard de rejets. Il peut être intéressant de comparer les solutions du Tableau 3 à la solution consistant à installer en chaque rejet une station d'épuration traitant les eaux jusqu'à la norme conventionnelle de 30 mg/l DBO. Le coût total s'élèverait dans ce cas à 730,5 millions d'escudos. Des solutions plus diversifiées, jouant sur les possibilités d'épurer tantôt plus, tantôt moins, permettent de réaliser des gains appréciables par rapport à cette solution figée. Ainsi, les solutions 1 et 2 réalisent-elles des économies respectives de 9,38 % et 27,27 % par rapport à la solution unifiée de 30 mg/l, laquelle ne respecte par ailleurs pas les critères de qualité imposés aux cours d'eau.

Pour le bassin du Tage (Tableau 4), dans la situation 1 (normes "peu exigeantes" : DBO ≤ 5 mg/l, DOD ≤ 4 mg/l), aucun traitement n'est requis pour les rejets directs au Tage. Les seuls traitements requis, très élevés, concernent 3 rejets (n° 11, 18 et 24) à des affluents déjà fortement pollués en amont des rejets en question (Atalaia, Almonda, Alpiarça). Les très hauts degrés de traitement requis (97 ... 98 %) s'expliquent par le débit très faible des affluents en question et par l'absence d'action sur les rejets en amont.

Dans la situation 2 (exigences plus poussées : DBO ≤ 3 mg/l, DOD ≤ 2 mg/l sur le cours du Tage), une épuration secondaire est requise pour tous les rejets en amont de Constância. À Constância, en raison de la forte dilution par le Zêzere (débit du Tage : 13 m³/sec; débit du

Zêzere : 56 m³/sec !!), seule une épuration primaire est requise pour Constância, et presque aucune épuration pour l'usine de pâte à papier de Caima ! Il ne faut évidemment accorder à ce résultat ponctuel pas plus d'importance que celle qu'il convient de donner à cet exercice de modélisation très sommaire (d'autres commentaires en ce sens dans la dernière partie). En aval de Constância, les eaux du Tage gonflées de celles du Zêzere ne requièrent pratiquement aucun traitement. La situation sur les affluents, avec les 3 rejets n° 11, 18 et 24, s'est évidemment confirmée et amplifiée par rapport à la situation 1.

4 - CONCLUSIONS

4.1 - Réalisme du modèle

Le modèle adopté pour le bassin du Tage représente la forme la plus simple des modèles actuellement élaborés dans ce genre d'études, puisqu'il fait intervenir les seules variables DBO et DOD et qu'il n'incorpore que les deux constantes fondamentales K_1 et K_2 . Des modèles plus complexes, plus "réalistes", prenant en compte d'autres paramètres de qualité et des constantes additionnelles, permettant de décrire des phénomènes tels que la sédimentation, la photosynthèse, .. existent dans la littérature (voir p. ex. RINALDI *et al.* 1979a et 1979b). La quantification de ces modèles requiert des résultats de mesures dont ne disposent en général pas les organismes chargés de l'étude, de sorte que les auteurs desdits modèles sont souvent contraints eux-mêmes à négliger les phénomènes "marginiaux" en question (RINALDI *et al.* 1979b) !! C'est également la situation qui se présente pour le bassin du Tage, de sorte qu'on ne peut espérer faire mieux qu'exploiter la version la plus simple des modèles de rivière. Par ailleurs nous avons souligné que dans l'estimation des constantes K_1 et K_2 , aucune mesure ne permettait une différenciation entre les divers tronçons du bassin. C'est la raison pour laquelle nous avons adopté une valeur moyenne pour chacune des deux constantes, valable pour les conditions d'été. Des méthodes plus raffinées existent pour moduler la valeur des constantes en fonction du régime hydrique (RINALDI *et al.* 1979b), et pourraient s'avérer utiles dans l'hypothèse ou des modèles reflétant des conditions autres que celles d'été devraient être mis en œuvre (voir la discussion au § 4.2.).

Un autre commentaire concerne le réalisme des fonctions de coût. Certaines hypothèses simplificatrices, liées une fois encore à la disponibilité de données pertinentes, sont sous-jacentes à l'élaboration des fonctions de coût utilisées [Éq. (7) et Tableau 1]. D'une part, les données utilisées, seules disponibles, ne permettent pas de discerner l'effet de différents types de procédés de traitement (p. ex. boues activées vs. lits bactériens) sur le coût total. Les fonctions de coût ne représentent donc au mieux qu'une "moyenne" entre les divers procédés de traitement applicables aux eaux résiduaires rencontrées. D'autre part, on a supposé qu'on pouvait extrapoler les données relatives à deux degrés de traitement (primaire et secondaire) à tous les degrés de traitement intermédiaires, de façon à permettre l'élaboration de fonctions de coût continues comme celles utilisées dans l'Éq. (7). Une forme peut-être plus réaliste du modèle consisterait à prendre en compte des fonctions de coût discontinues, excluant la possibilité de degrés de traitement intermédiaires.

Dans la discussion et l'interprétation des résultats obtenus par le modèle, il convient d'avoir à l'esprit les simplifications et approximations que l'on vient d'évoquer, qui conditionnent le fonctionnement du modèle dans son ensemble.

4.2 - Réalisme de l'application

Pour le Tage, les résultats enregistrés ont confirmé la bonne santé du fleuve, du moins sur le tronçon en aval du confluent avec le Zêzere, en raison de l'importante dilution par ce dernier affluent, du débit important du Tage lui-même et du faible nombre de rejets importants d'eaux résiduaires. Dans les pires conditions testées (modèle d'été), des stations d'épuration de type secondaire (biologique) doivent être envisagées seulement dans la portion du Tage située en amont du confluent avec le Zêzere (portion à faible débit), et ce uniquement pour les normes de qualité les plus sévères. En cas de normes moins restrictives, et vraisemblablement au cours des périodes

à débit plus important, pratiquement aucune épuration ne sera requise pour les rejets d'eaux résiduaires au Tage lui-même.

Les résultats enregistrés font également apparaître, ou plutôt confirmer, qu'il serait plus pertinent d'appliquer le modèle à certains affluents du Tage, beaucoup plus pollués et de débit nettement inférieur à celui du Tage. L'illustration de ce fait a été fournie par l'application du modèle au bassin du Rio Nabão (voir § 3.3). L'application pourrait s'envisager à chaque affluent indépendamment des autres, puisque la dilution par le Tage fait disparaître toute possibilité d'interaction entre les affluents au niveau de la qualité. Par ailleurs, pour les affluents comme pour le Tage lui-même, il serait également adéquat de formuler le modèle pour des régimes hydrologiques diversifiés, en plus de celui, extrême, déjà envisagé dans notre problème test.

La prise en compte de régimes hydrologiques variables au cours de l'année peut amener à moduler le traitement des eaux usées en fonction de l'intensité de la charge polluante et du débit des cours d'eau récepteurs. De cette façon, tout en respectant les critères de qualité, des économies appréciables peuvent résulter d'une exploitation moins poussée des stations d'épuration lors des périodes favorables (débit élevé des cours d'eau, faible charge polluante). Le modèle d'été et le modèle d'hiver peuvent donc entrer simultanément dans la formulation d'un modèle plus général, prenant en compte le dimensionnement et la possibilité de moduler l'exploitation des stations d'épuration. Ce type de modèle a déjà fait l'objet de recherches et son application peut être proposée (HERBAY *et al.* 1983).

Par ailleurs, le modèle de planification des degrés de traitement, décrit et utilisé dans les sections antérieures (§ 2 et 3), part d'un ensemble de points, déjà localisés le long des cours d'eau du bassin, où a lieu le déversement d'eaux résiduaires éventuellement épurées. Or, cette localisation doit faire elle-même l'objet de décisions. Des économies substantielles peuvent être attendues d'un regroupement adéquat d'eaux usées provenant de plusieurs réseaux d'égoûts, par le biais de collecteurs appropriés acheminant les eaux vers des stations d'épuration adéquatement localisées. C'est précisément l'objet du modèle d'implantation de stations d'épuration : déterminer, dans une région donnée, le tracé et le dimensionnement de collecteurs destinés à recueillir l'ensemble des eaux résiduaires, ainsi que le nombre, la localisation et la taille de stations d'épuration permettant de traiter ces eaux résiduaires avant leur rejet aux cours d'eau récepteurs, et ce au moindre coût global de collecte et d'épuration. Un tel modèle d'implantation a été mis au point, sous une forme particulièrement souple et efficace, à l'Université de Louvain (SMEERS & TYTECA 1983; TYTECA *et al.* 1985; TYTECA 1988). Son utilisation se situe évidemment en amont et doit être envisagée avant de recourir au modèle de planification des degrés de traitement. Idéalement, la décision doit porter simultanément sur l'implantation et la détermination des degrés de traitement : c'est l'objet de modèles globaux, plus sophistiqués, dont des versions existent déjà (SMEERS & TYTECA 1982, 1985; TYTECA 1988).

5 - Remerciements

Je tiens à remercier vivement les membres de l'équipe de la Direcção- Geral dos Recursos e Aproveitamento Hidráulicos du Ministère de l'Équipement Social de Lisbonne, dont la collaboration a permis de mener à bien les travaux décrits. Que soient remerciés en particulier MM. L. A. JUNÇA DE MORAIS et J. NOBRE SANTOS. Les recherches ont été poursuivies sous l'égide de l'UNESCO et de l'O.M.S.

6 - Bibliographie

- ABADIE, J., 1978, The GRG method for nonlinear programming, in *Design and Implementation of Optimization Software*, H.J. GREENBERG, ed., Sijthoff & Noordhoff, Alphen-aan-den-Rijn (Pays-Bas), 335-362.
- ECKER, J.G., 1975, A geometric programming model for optimal allocation of stream dissolved oxygen, *Management Science* **21**, 658-668.
- HERBAY, J.P., SMEERS, Y. & TYTECA, D., 1983, Water quality management with time varying river flow and discharger control, *Water Resources Research* **19**, 1481-1487.

- RINALDI, S., SONCINI-SESSA, R., STEHFEST, H. & TAMURA, H., 1979a, Modeling and Control of River Quality. McGraw-Hill, Inc., London.
- RINALDI, S., ROMANO, P. & SONCINI-SESSA, R., 1979b, Parameter estimation of Streeter-Phelps models, *Journal of the Environmental Engineering Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers* **105**, 75-88.
- SMEERS, Y. & TYTECA, D., 1982, Optimal location and design of wastewater treatment plants under river quality constraints, in *Environmental Systems Analysis and Management*, RINALDI, S., ed., North Holland Publishing Company, Amsterdam, 289-310.
- SMEERS, Y. & TYTECA, D., 1983, On the optimal location of wastewater treatment plants, in *Locational Analysis of Public Facilities*, THISSE, J. & ZOLLER, H., eds., North Holland Publishing Company, Amsterdam, 395-412.
- SMEERS, Y. & TYTECA, D., 1985, A model for optimal wastewater management in a river basin, in *Appropriate Waste Management for Developing Countries*, CURTI, K., ed., Plenum Press, New York & London, 599-618.
- TYTECA, D., 1984, Optimisation économique du traitement des eaux résiduaires dans un bassin de rivière - Résolution par le programme du gradient réduit généralisé - Application au bassin du Rio Nabão (affluent secondaire du Tage, Portugal). Rapport d'une mission au Portugal, dans le cadre du Plan National de l'Eau portugais, projet du PNUD POR/82/004 février-mars 1984, UNESCO.
- TYTECA, D., 1986, Application d'un modèle de planification des degrés de traitement des eaux résiduaires au cours principal du Tage. Rapport d'une mission au Portugal, 14-25 avril 1986, dans le cadre du projet *Lutte contre la pollution et contrôle de la qualité des eaux du Tage* de l'Organisation Mondiale de la Santé. Rapport POR/CWS 001 - PNUD/POR/80/001 - 3023 i de l'O.M.S.
- TYTECA, D., 1988, Optimisation du dimensionnement et de la localisation des équipements de collecte et d'épuration d'eaux résiduaires, in *Gestion de l'économie et de l'entreprise - L'approche quantitative*, CORE (éd.), De Boeck - Université, Bruxelles, Coll. Ouvertures Économiques, Série Balises, chap. 6, 427-453.
- TYTECA, D., REYNTJENS, P. & COVELIERS, G., 1985, On the optimal location of wastewater treatment plants in lowland areas, in Proceedings of the Vth IWRA (International Water Resources Association) World Congress on Water Resources : *Water Resources for Rural Areas and their Communities*, Bruxelles, 9-15 June 1985, paper n. 33, 103-112.