

Thèse de doctorat

**LE CONTROLE EN TEMPS REEL
DES RESEAUX D'EGOUTS UNITAIRES**

Présentée à

L'UNIVERSITE DU QUEBEC

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

INRS-EAU

par

LUCIE WILSON

Octobre 1987

SOMMAIRE

Le contrôle automatique en temps réel constitue une nouvelle approche au problème des débordements de réseaux unitaires. Une revue de la littérature pertinente nous a permis d'une part, de cerner la problématique de ces débordements, et d'autre part, de connaître l'état actuel de la technologie dans ce domaine. Ces lectures nous ont montré qu'il subsiste de nombreuses difficultés susceptibles de limiter l'application du contrôle en temps réel. En particulier, le contrôle basé sur la minimisation des charges polluantes déversées se révèle difficilement réalisable, car les méthodes autorisant la mesure en continu de la qualité sont inexistantes pour certains paramètres, et très peu fiables pour les autres.

Nous proposons donc ici deux hypothèses pouvant nous permettre, en dépit de ces difficultés, de réaliser un contrôle qualitatif en temps réel. Premièrement, il est possible d'estimer les concentrations des paramètres de qualité à partir de relations simples impliquant une variable facilement mesurable en temps réel, comme le débit. De nombreuses tentatives de corrélation entre le débit et la concentration ont été répertoriées, et les résultats en sont généralement jugés peu satisfaisants. Cependant, nous croyons que ces relations, même si elles ne sont pas très précises, peuvent s'avérer suffisantes pour mettre en oeuvre un contrôle prédictif intégré basé sur une simple estimation de la qualité.

Notre seconde hypothèse a pour but de contrer les difficultés observées au niveau de la caractérisation de la qualité des eaux unitaires. Plutôt que de privilégier une approche faisant intervenir des indices de qualité, nous avons préféré diriger le contrôle en fonction d'un seul paramètre. Nous croyons que si ce paramètre est choisi en tenant compte de sa corrélation avec les autres et de l'importance de son impact sur le milieu récepteur, le contrôle résultant pourra quand même se révéler avantageux pour l'ensemble des paramètres de qualité.

Pour vérifier ces deux hypothèses, nous avons mis au point un programme de simulation numérique du contrôle en temps réel d'un réseau unitaire. Comme les études précédentes se limitaient à l'utilisation d'algorithmes de transfert par délai pur, nous avons décidé d'opter pour un modèle d'écoulement non-linéaire capable de reproduire l'effet de laminage observé dans les conduites. Le recours à un tel modèle exige l'emploi de méthodes d'optimisation non-linéaires, ce qui constitue également une nouveauté dans le domaine.

Les résultats des simulations effectuées confirment le bien-fondé de nos hypothèses. Cependant, il a été constaté que la performance du contrôle résultant demeure marginale. En effet, celui-ci ne procure pas une réduction vraiment significative des charges polluantes déversées en comparaison de celles qui sont obtenues avec un contrôle réactif local. En conséquence, la pertinence de procéder à l'installation d'un contrôle prédictif intégré n'est pas démontrée. Le contrôle réactif local demeure donc, à notre avis, le meilleur système de contrôle en temps réel des réseaux unitaires.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont en tout premier lieu à monsieur Jean-Pierre Villeneuve pour son dévouement, sa compréhension et les judicieux conseils qu'il m'a donnés. Il a été une source constante d'encouragements, y ajoutant son inconditionnelle amitié, et je ne saurais assez l'en remercier.

Je désire également remercier monsieur Pierre Lavallée pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée lors de nombreuses et stimulantes discussions, ainsi que pour m'avoir fourni les données qui ont été utilisées dans ce travail.

Finalement, je tiens à souligner le soutien financier procuré par le CRSNG, le fonds FCAR, ainsi que par l'INRS-Eau.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	i
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIERES	iv
Chapitre I	
1. INTRODUCTION	2
Chapitre II	
2. REVUE DE LA LITTERATURE	5
2.1 La problématique des débordements de réseaux unitaires	5
2.1.1 Origine des débordements	5
2.1.2 Caractérisation des eaux de débordement	6
2.1.3 Impact sur le milieu récepteur	8
2.1.4 Solutions proposées	10
2.2 Le contrôle automatique des réseaux unitaires	12
2.2.1 Les structures de régulation	12
2.2.2 Les systèmes de contrôle des régulateurs	

	dynamiques	13
2.2.3	Les stratégies de contrôle	14
2.2.4	Intégration de la qualité dans le contrôle prédictif	16
 Chapitre III		
3.	OBJECTIFS DE L'ETUDE	24
 Chapitre IV		
4.	METHODOLOGIE EXPERIMENTALE	29
4.1	Les données utilisées	32
4.2	Le modèle de transfert en réseau	38
4.3	Le modèle de prédiction des débits	41
4.4	Le modèle de plan d'action	42
4.5	La méthode d'optimisation	44
4.5.1	Choix de la méthode	45
4.5.2	Choix du critère de convergence	58
4.6	L'horizon de prédiction	67
4.6.1	L'horizon de prédiction et le modèle de transfert en réseau	68
4.6.2	L'horizon de prédiction et la méthode	

	d'optimisation	72
4.7	L'évaluation du plan d'action	73
Chapitre V		
5.	RESULTATS ET DISCUSSION	76
5.1	Choix du paramètre de contrôle	76
	5.1.1 Corrélations entre paramètres	77
	5.1.2 Simulations	79
	5.1.3 Autres considérations	83
	5.1.4 Paramètre choisi	86
5.2	Choix d'un modèle de qualité	87
	5.2.1 Les modèles essayés	87
	5.2.2 Calibration des modèles	89
	5.2.3 Résultats des simulations	97
5.3	Evaluation des résultats et discussion	116
	5.3.1 Qualité du contrôle obtenu	116
	5.3.2 Influence sur les autres paramètres	120

5.3.3	Application à d'autres situations	124
Chapitre VI		
6.	CONCLUSION	130
	REFERENCES	133
ANNEXE A		
	Description du modèle utilisé	
ANNEXE B		
	Hydrogrammes et pollutogrammes de la pluie étudiée	
ANNEXE C		
	Complément sur le contrôle automatique des réseaux unitaires	

CHAPITRE I

1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, il se fait beaucoup de recherches dans le domaine du contrôle en temps réel des réseaux d'égouts unitaires. Une des principales raisons de cet effort scientifique est la récente prise de conscience des impacts négatifs causés par les débordements de réseaux en temps de pluie. Le contrôle en temps réel offre en effet d'intéressantes possibilités de réduire ces impacts sans modifier à outrance la structure des réseaux existants. Bien qu'il ne s'agisse pas encore d'une réalité qui soit largement répandue, il est à prévoir que dans un avenir assez rapproché, cette technologie soit de plus en plus utilisée, étant donné les derniers développements survenus dans les domaines du contrôle numérique et de la micro-informatique.

Participant à cet élan, la présente recherche a pour objectif le développement d'une méthodologie permettant de réduire les impacts des débordements sur les cours d'eau récepteurs. Comme dans plusieurs autres études, la solution recherchée passe par la minimisation des charges polluantes déversées. Cependant, en raison des nombreuses difficultés entourant la mesure de la qualité en temps réel, nous nous proposons d'y suppléer par l'emploi de modèles simples permettant d'estimer la qualité à partir de la mesure des débits.

Pour bien exposer la problématique des débordements de réseaux unitaires et situer l'état actuel de la technique pertinente au contrôle automatique, nous

présenterons tout d'abord une brève revue de la littérature consultée. Nous avancerons ensuite quelques hypothèses susceptibles de démontrer la faisabilité d'un contrôle qualitatif en temps réel. Pour vérifier le bien-fondé de ces hypothèses, nous procéderons à des simulations informatiques de contrôle en temps réel d'un réseau unitaire pour lequel nous possédons des données récoltées pendant plusieurs événements de pluie. Le modèle de simulation sera développé expressément pour les fins de cette étude et nous comptons y introduire des particularités qui le distingueront des modèles préalablement utilisés dans la littérature. Finalement, les résultats de nos simulations seront examinés en détail et nous discuterons alors de la validité des hypothèses proposées. Des conclusions concernant l'application concrète de nos idées pourront ensuite être avancées.

CHAPITRE II

2. REVUE DE LA LITTERATURE

2.1 La problématique des débordements de réseaux unitaires

2.1.1 Origine des débordements

Dans un réseau unitaire, les conduites doivent transporter à la fois les eaux usées domestiques et les eaux de ruissellement urbain qui sont générées durant les épisodes pluvieux. Malgré la tendance actuelle à construire des réseaux séparés, il n'en demeure pas moins que plus de 80% de la population urbaine du Québec est encore desservie par des système unitaires.

Les collecteurs d'un réseau unitaire sont habituellement dimensionnés de façon à accepter un débit maximal égal à celui engendré par une pluie de période de récurrence d'environ 10 ans. Ces conduites ont donc un diamètre suffisamment grand pour leur permettre d'évacuer le plus rapidement possible les importants volumes de ruissellement qui sont produits en milieu urbain. Cependant, pour des raisons techniques et économiques, les intercepteurs et les usines d'épuration ne sont pas conçus pour accepter tout ce débit. Leur capacité n'est ordinairement que de 2 à 4 fois le débit moyen de temps sec, alors qu'en temps de pluie, les débits collectés peuvent être jusqu'à 20 fois supérieurs au débit de temps sec. C'est

pourquoi, à la jonction entre les collecteurs et l'intercepteur, il y a des structures de régulation dont le rôle est de détourner les débits excédentaires des collecteurs vers le cours d'eau récepteur.

Les débordements de réseaux unitaires sont beaucoup plus fréquents qu'on ne le pense généralement. Par exemple, sur le territoire de la ville de Québec, les conditions météorologiques locales et le désign du réseau sont tels que des débordements se produisent en moyenne à tous les 5 jours durant la période estivale (Lavallée et Lessard, 1984).

2.1.2 Caractérisation des eaux de débordement

On a longtemps considéré que les débordements étaient constitués d'un peu d'eaux usées d'origine sanitaire diluées dans beaucoup d'eaux propres provenant du ruissellement urbain. On ne voyait donc pas d'inconvénients à rejeter à la rivière les volumes en excès générés en période de pluie. Actuellement, cette idée est complètement abandonnée et plusieurs études ont mis en évidence l'importance de la charge polluante qui est contenue dans les eaux de ruissellement, et par le fait même, dans les débordements.

Les contaminants retrouvés dans les eaux de débordement de réseaux unitaires proviennent de trois sources: la charge sanitaire normale de temps sec, la charge de lessivage des surfaces urbaines par le ruissellement et la charge de remise en suspension des dépôts de temps sec accumulés dans les conduites. Chacune de ces sources de pollution a ses caractéristiques particulières, et le mélange qui en résulte constitue malheureusement une menace sérieuse pour la qualité des eaux réceptrices.

Ainsi, les eaux sanitaires contiennent principalement des matières organiques dissoutes et particulaires, de même que des substances nutritives comme les composés d'azote et de phosphore. On y retrouve également une grande variété de microorganismes. Quant à la charge provenant du ruissellement urbain, elle est surtout composée de solides en suspension, pour la plupart inorganiques, et de métaux lourds. Elle renferme aussi des matières organiques, et dans une proportion plus faible, des nutriments et des microorganismes. Finalement, l'érosion des conduites qui est causée par l'augmentation des vitesses d'écoulement en période de crue produit une charge qui est composée en majeure partie de solides organiques facilement décantables.

La qualité des eaux de débordement est extrêmement variable. Il est difficile de la prédire puisqu'elle va dépendre à la fois des caractéristiques du bassin et de celles de l'épisode pluvieux. A titre d'exemple, nous pouvons citer les résultats de Lavallée et Lessard (1984) montrant que, pendant toute la durée d'un événement de pluie, les concentrations de polluants dans le réseau unitaire de la ville de Québec

sont de beaucoup supérieures à celles mesurées en temps sec. Dans le cas des MES et des métaux, les concentrations maximales sont en moyenne 10 fois plus élevées que celles de temps sec; tandis que pour la DCO, ce rapport est de l'ordre de 2 à 3 fois.

2.1.3 Impact sur le milieu récepteur

La nocivité des eaux de débordement tient pour beaucoup à l'effet de choc qu'elles produisent sur le milieu récepteur. Le rejet d'une grande quantité de polluants en un laps de temps très court provoque en effet une modification brutale des conditions du milieu, ce qui peut entraîner de graves répercussions au niveau des communautés biologiques.

Etant donné leur forte décantabilité, les polluants contenus dans les eaux de débordement vont pour la plupart sédimenter sur le lit du cours d'eau récepteur. Selon Lavallée et al. (1984), il semble que 85% de la charge totale débordée se dépose à proximité du point de rejet. Et comme les déversements sont généralement effectués en bordure de rive, là où les capacités de dispersion sont plutôt limitées, il peut en résulter des zones d'accumulation. Ces dernières risquent de présenter un potentiel de toxicité assez élevé en raison du rôle de support que

jouent les MES envers les métaux. En effet, ces sédiments ne doivent pas être considérés comme un site d'emménagement sûr et permanent des métaux. Du fait de leur forte teneur en matières organiques, il peut s'y créer des conditions anoxiques telles qu'il y aura réduction totale ou partielle des oxydes de fer et de manganèse, entraînant ainsi la libération des métaux qui leur étaient associés (Forstner et Wittmann, 1981).

Enfin, plusieurs auteurs soulignent l'importance de la quantité de matières organiques rejetées par les débordements. Ainsi, Field et Turkeltaub (1981) rapportent que sur une base annuelle, la charge organique totale déversée en période de pluie est du même ordre de grandeur que celle véhiculée en temps sec dans le réseau unitaire. Cette charge organique va provoquer deux types d'impacts sur la teneur en oxygène dissous du milieu récepteur. Il y a d'abord une demande immédiate en oxygène qui est vraisemblablement exercée par la biodégradation de la matière organique soluble. On observe ensuite une demande retardée qui est causée par la dégradation de la matière organique particulaire qui s'est déposée sur le lit du cours d'eau après le déversement. En raison de cet impact retardé, la détérioration de la qualité du milieu récepteur va persister un certain temps après la fin du débordement.

2.1.4 Solutions proposées

Les conséquences environnementales des débordements de réseaux unitaires ont été pendant trop longtemps sous-estimées, voire ignorées. Et compte tenu du potentiel de contamination que ces rejets représentent, il est illusoire de penser rétablir tous les usages du cours d'eau si aucune tentative n'est réalisée dans le but d'atténuer leur impact. Cependant, avec la prise de conscience de ce problème sont apparues plusieurs solutions dont la plus récente, le contrôle automatique en temps réel, requiert l'emploi de moyens techniques assez sophistiqués.

Les divers moyens d'action qui ont été proposés peuvent être séparés en trois catégories. Il y a d'abord des mesures de type structurel qui nécessitent le design et la construction de nouvelles infrastructures dans le réseau. Il peut s'agir par exemple de réservoirs qui permettent d'emmagasiner temporairement les surplus collectés, pour ensuite les diriger vers l'usine d'épuration après la fin de la pluie. Bien que coûteux, les réservoirs constituent une solution efficace et ils permettent d'éviter l'agrandissement d'anciens collecteurs devenus insuffisants. Une autre mesure structurelle possible serait celle qui consiste à intercepter toutes les eaux collectées en temps de pluie pour les traiter dans une usine spécialement conçue à cet effet. Cette solution est très onéreuse, et en raison de l'importance des volumes à traiter, elle nécessite des installations gigantesques qui ne vont être opérées qu'épisodiquement.

Il existe d'autre part des mesures non-structurelles qui font surtout appel à la gestion des opérations du réseau. Aucun investissement majeur n'est alors requis, mais les frais d'opération s'en trouvent accrus. Il peut s'agir par exemple de l'entretien du système et de la correction de ses défauts (infiltration et captage). Il peut aussi s'agir de contrôle à la source au moyen d'une politique de réglementation des branchements, ou encore d'un plan d'aménagement du territoire conçu en fonction du retardement et de l'atténuation du ruissellement. Egalement, le nettoyage des rues est une mesure préventive qui permet de diminuer les charges débordées en période de pluie. Il en est de même pour les opérations de vidange des puisards de rue et pour le curage des conduites. Cette dernière mesure est particulièrement efficace, avec des réductions des charges débordées de l'ordre de 20 à 30% (Field et Turkeltaub, 1980).

Il y a finalement des mesures semi-structurelles qui combinent les deux approches précédentes. Une des plus courantes consiste en l'installation de régulateurs qui, en plus de leur rôle hydraulique, ont une action d'épuration; ou encore, permettent la réalisation d'un contrôle en temps réel du réseau. Ainsi, le séparateur statique tourbillonnaire permet d'effectuer une sélection qualitative des effluents en évacuant vers le milieu récepteur des eaux qui sont partiellement débarrassées de leurs matières décantables et flottantes. Un autre exemple est celui des régulateurs dynamiques qui, lorsqu'ils sont équipés de contrôleurs numériques, peuvent être commandés à distance. Il devient alors possible de réaliser une gestion intégrée du réseau à partir d'un poste central de commande. Ce dernier aspect sera traité de façon plus élaborée dans les prochaines sections.

2.2 Le contrôle automatique des réseaux unitaires

On dit d'un réseau qu'il est contrôlé en temps réel lorsque son état est continuellement évalué et que cette information est immédiatement utilisée dans le but de déterminer de façon automatique les ajustements nécessaires à son bon fonctionnement. Dans ce chapitre, nous allons d'abord discuter du matériel nécessaire pour effectuer la régulation automatique des réseaux, puis nous enchaînerons avec les différentes stratégies qui peuvent être employées pour mettre en oeuvre ce contrôle.

2.2.1 Les structures de régulation

Dans un réseau d'égout, on retrouve, à la jonction entre les collecteurs et l'intercepteur, des structures de régulation dans lesquelles s'effectue le contrôle de la circulation des eaux usées. Ce sont ces ouvrages qui assurent que les débits transitant des collecteurs vers l'intercepteur n'excèdent jamais la capacité maximale de ce dernier. Le contrôle y est effectué par un dispositif fixe ou mobile chargé de limiter le débit admissible en dérivant les volumes en excès vers la conduite de débordement.

Tout dépendant du mécanisme responsable du contrôle de l'écoulement, on distingue deux types de régulateurs. Il y a d'abord les régulateurs statiques qui sont des structures fixes et passives dont les caractéristiques hydrauliques permettent de limiter le débit envoyé à l'intercepteur. Il y a ensuite les régulateurs dynamiques où le contrôle est effectué à l'aide d'un ensemble de pièces mobiles constituant ainsi un mécanisme de rétroaction. Ces divers équipements sont décrits de manière plus détaillée à l'annexe C.

2.2.2 Les systèmes de contrôle des régulateurs dynamiques

Il y a plusieurs façons de contrôler les débits en provenance des collecteurs unitaires à partir d'un régulateur dynamique. Au niveau de l'appareillage, on peut faire la distinction entre les contrôleurs analogiques et numériques, tout dépendant du mode de transmission des informations nécessaires à la régulation. Au niveau de l'emplacement des contrôleurs, on va parler de contrôle distribué si chaque régulateur possède son propre contrôleur local, et de contrôle centralisé si tous les contrôleurs locaux sont remplacés par un ordinateur agissant au moyen d'un système de télémétrie.

Le type de contrôleur analogique le plus fréquent est le contrôleur mécanique, dont le fonctionnement est décrit à l'**annexe C**. Beaucoup plus flexible que le précédent, le contrôleur numérique offre l'avantage d'être couplé à des capteurs électroniques et à des actionneurs motorisés. Il peut être programmé pour effectuer un contrôle local au niveau de chacun des régulateurs, ou encore être commandé à distance à partir d'un poste central de façon à obtenir une gestion intégrée de l'ensemble du réseau.

En plus de ces deux modes de contrôle de type distribué, il est également possible de réaliser un contrôle centralisé. Celui-ci ne requiert pas l'emploi de contrôleurs numériques puisque les ajustements nécessaires sont effectués directement à partir d'un ordinateur central.

2.2.3 Les stratégies de contrôle

Le contrôle automatique en temps réel implique qu'à chaque pas de temps, il faut prendre une décision concernant la conduite du système. Pour automatiser cette prise de décision, il est utile d'avoir recours à une stratégie de contrôle. Les deux stratégies utilisées le plus fréquemment sont le contrôle réactif local et le contrôle prédictif intégré.

Dans une stratégie réactive locale, les structures de régulation sont opérées de manière indépendante, et les décisions de contrôle ne sont basées que sur les informations de l'état présent du système. L'objectif recherché est généralement d'assurer une utilisation maximale de la capacité de l'intercepteur. Chaque contrôleur a donc pour tâche de diriger vers l'intercepteur un apport équivalent au débit maximal que peut accepter la conduite. En conséquence, la stratégie réactive locale va permettre de minimiser le volume total des rejets.

A l'inverse de la précédente, la stratégie prédictive intégrée prend en considération l'ensemble des régulateurs du réseau. De plus, au moment de la prise de décision, elle a également recours à des prédictions de l'état futur du système.

Cette capacité à anticiper les conséquences à l'aval du réseau de décisions appliquées en amont va permettre à la stratégie de pouvoir exercer un certain contrôle sur la répartition des débordements entre les différents points de rejet. En effet, comme elle n'est pas limitée uniquement à une minimisation systématique des volumes de débordement, comme c'était le cas pour le contrôle réactif local, il lui est possible d'effectuer entre les régulateurs des transferts qui vont se révéler avantageux au niveau de la qualité des eaux déversées. Par exemple, pour empêcher le rejet d'eaux fortement chargées en aval, la stratégie peut décider d'augmenter volontairement les rejets à un régulateur amont où la qualité des eaux collectées est meilleure.

Pour assurer à ces transferts une certaine optimalité, le contrôle prédictif intégré fait usage de modèles numériques permettant la simulation de l'état futur du réseau pour une certaine période de temps appelée horizon de prédiction. Les ajustements à donner à chacun des ouvrages de régulation sont déterminés au moyen d'une technique d'optimisation qui est basée sur la simulation répétée de différents plans d'action. Le plan de contrôle qui s'avère optimal en regard des objectifs visés est finalement appliqué.

On retrouvera à l'**annexe C** une explication plus élaborée de ces deux stratégies, ainsi que les organigrammes définissant leur algorithme de contrôle.

2.2.4 Intégration de la qualité dans le contrôle prédictif

Lorsque l'objectif du contrôle est simplement la minimisation des volumes de débordement, sans égard à leur répartition entre les différents points de rejet, la stratégie réactive locale et la stratégie prédictive intégrée sont tout aussi performantes (Nguyen Van et al., 1982)

En effet, dans le contrôle réactif local, tous les contrôleurs sont ajustés de façon à utiliser au maximum la capacité disponible dans l'intercepteur, ce qui nous

garantit la minimisation des volumes rejetés. Un tel but peut également être atteint dans une stratégie prédictive intégrée en formulant l'objectif du contrôle de la manière suivante:

$$F = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_i (t_p + j\Delta t)$$

où:

$Q_i(t)$: débit déversé au point de rejet i au temps t

n : nombre de points de rejet

m : nombre de pas de temps de l'horizon de prédiction

t_p : temps présent

Δt : pas de temps

Ainsi, un contrôle prédictif basé sur la minimisation des volumes de débordement ne pourra pas faire mieux qu'un contrôle réactif local, faute de place dans l'intercepteur. De par son fonctionnement, le contrôle réactif local n'est donc pas autre chose qu'un contrôle intégré dont le temps de prédiction est nul (Nguyen Van et Osseyrane, 1987).

Cependant, parce qu'elle permet, dans une certaine mesure, de modifier la répartition spatiale et temporelle des débordements (par rapport à celle qui est

obtenue avec un contrôle réactif local), la stratégie prédictive nous donne ainsi la possibilité de moduler les impacts sur le milieu récepteur. Nous avons identifié deux approches qui permettent de tenir compte de la qualité des débordements. La première approche prend en considération la qualité des eaux réceptrices, tandis que dans la seconde, c'est la qualité des eaux à déverser qui entre en ligne de compte.

A) Première approche

La première approche consiste à imposer à l'ordinateur le respect de certaines contraintes relatives au milieu récepteur lors de la recherche des plans d'action optimaux. On peut par exemple le forcer à empêcher les débordements qui se produisent à certains régulateurs, ceci afin de protéger des tronçons de cours d'eau particulièrement sensibles. On peut également, jusqu'à un certain point, chercher à privilégier les déversements qui se produisent à certains moments plutôt qu'à d'autres. L'objectif du contrôle va alors consister à minimiser le volume total des rejets, tout en s'assurant que ceux-ci se produisent aux endroits et aux instants pour lesquels la dégradation globale de la qualité du cours d'eau va être la plus faible.

Pour réaliser un contrôle qui permette d'accorder une protection prioritaire à certains points de rejet prédéterminés, il est nécessaire de pondérer les volumes déversés. L'objectif de la stratégie peut être exprimé de la façon suivante:

$$F = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_i(t_p + j\Delta t) Q_i(t_p + j\Delta t)$$

où:

$W_i(t)$: coefficient de pondération des rejets au point i au temps t

Le principal avantage de cette approche est qu'elle ne nécessite pas de mesures ni de simulations de la qualité en temps réel. En effet, les priorités quant à l'emplacement et au moment des rejets ont été définies au préalable à partir de l'évaluation de leur impact respectif sur le milieu récepteur. Ceci peut être réalisé à l'aide d'un modèle de qualité en rivière qui est utilisé "off-line" afin de simuler l'impact global des déversements, pour différentes répartitions des volumes de rejet. On peut ainsi en arriver à déterminer la combinaison de coefficients de pondération pour laquelle la dégradation de la qualité du cours d'eau est minimale.

B) Deuxième approche

La seconde approche identifiée consiste à minimiser les charges polluantes déversées pour un paramètre de qualité donné. La stratégie va alors chercher à intercepter en priorité les débits en provenance des collecteurs unitaires pour lesquels la concentration du polluant considéré est la plus élevée. Cet objectif peut se traduire de la façon suivante:

$$F = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_i(t_p + j\Delta t) Q_i(t_p + j\Delta t)$$

où:

$C_i(t)$: concentration du polluant au point de rejet i au temps t

Contrairement à l'approche précédente, l'emplacement et le moment des rejets vont dépendre de la qualité des apports des collecteurs (et non de la qualité du milieu récepteur), ce qui implique la mesure en temps réel de cette qualité. Cependant, comme la plupart des paramètres de qualité ne peuvent être mesurés de manière fiable et continue avec les moyens technologiques actuellement disponibles, cette approche peut sembler difficilement réalisable. La revue de

littérature nous a en effet révélé que, mis à part la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et la turbidité, très peu de caractéristiques des eaux peuvent être mesurées in situ (Geiger, 1984). De plus, la plupart de ces paramètres ne sont malheureusement pas représentatifs d'un contaminant dont le rejet entraîne une détérioration importante de la qualité du milieu récepteur.

Pour contourner cette difficulté, plusieurs auteurs ont examiné la possibilité d'établir des corrélations entre des paramètres de qualité fondamentaux et certaines caractéristiques physico-chimiques qui sont plus facilement mesurables en temps réel. Ainsi, diverses équations empiriques ont été proposées par Lessard (1981) dans le but de relier la concentration ou la charge de MES à la turbidité. Les résultats obtenus ne sont cependant pas très significatifs, et selon l'auteur, ils présentent peu d'intérêt dans le cadre d'un modèle de prédiction de la qualité en temps réel. Une tentative similaire réalisée par Geiger (1984) a montré que même s'il existait une dépendance entre la turbidité et le contenu en solides, la mesure de ce paramètre ne pouvait pas remplacer l'analyse individuelle des MES.

Ces différentes constatations ont amené d'autres auteurs à tenter d'établir des relations entre un paramètre de qualité donné et la valeur correspondante du débit. Il s'agit là d'une approche intéressante dont les avantages proviennent de la facilité avec laquelle le débit peut être mesuré en temps réel. De nombreuses relations ont été essayées, mais sans grand succès. Les corrélations obtenues entre le débit et la concentration d'un élément polluant sont généralement peu satisfaisantes, même lorsqu'on a recours à diverses transformations mathématiques des données.

C) Performance de ces deux approches

Les deux approches précédentes ont été analysées par Nguyen Van et Osseyrane (1987) dans le cadre d'une étude qui visait à démontrer les avantages pouvant être obtenus par la mise en oeuvre d'un contrôle centralisé qui tient compte de la qualité des eaux unitaires.

Dans un premier temps, les résultats d'un contrôle prédictif intégré basé sur la minimisation des charges de MES ont été comparés à ceux d'une stratégie réactive locale. Le contrôle intégré s'est effectivement révélé plus performant, en permettant une réduction moyenne des charges déversées de l'ordre de 13.9 % par rapport à celles obtenues avec un contrôle réactif local.

Dans une deuxième série de simulations, des coefficients de pondération ont été introduits dans la fonction objectif de minimisation des volumes déversés, ceci afin de protéger certains régulateurs jugés plus sensibles. Le contrôle obtenu a permis d'éliminer presque complètement les débordements aux sites privilégiés, sans pour autant affecter de façon significative la charge totale rejetée.

Ces résultats s'avèrent donc extrêmement intéressants et démontrent le potentiel d'une stratégie prédictive intégrée dans le cadre de la minimisation des impacts sur le milieu récepteur.

Chapitre III

3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Nous avons vu au chapitre précédent que la stratégie réactive locale pouvait effectuer la minimisation des volumes de débordement. Elle permet donc, par rapport à une situation où les déversements ne sont pas contrôlés, de diminuer les impacts sur le cours d'eau récepteur. Cependant, nous avons également fait remarquer qu'il était possible d'améliorer ce contrôle. En effet, la stratégie prédictive intégrée nous donne en plus l'opportunité de minimiser les charges polluantes déversées.

La minimisation des charges déversées nous apparaît plus conforme aux objectifs précédemment établis et c'est pourquoi nous privilégions cette approche. Il nous semble en effet plus logique de prendre en considération la qualité des débordements si on désire en contrôler les impacts sur l'environnement.

Cependant, malgré les avantages évidents d'un contrôle qui tient compte de la qualité des eaux à déverser, il existe un empêchement majeur à sa réalisation. La mesure de la qualité en temps réel présente en effet d'importantes difficultés techniques qui ne sont pas encore complètement résolues. Les dispositifs de mesure qui sont présentement sur le marché ne possèdent pas la fiabilité nécessaire pour pouvoir être utilisés dans le cadre d'un contrôle automatique en temps réel.

Nous croyons néanmoins qu'il est tout de même possible de réaliser un contrôle qualitatif en temps réel. Celui-ci pourrait être basé sur une évaluation

indirecte de la qualité, c'est-à-dire que la qualité y serait évaluée, en temps réel, à partir d'un modèle utilisant les données qui sont actuellement disponibles, comme par exemple les débits.

De nombreuses tentatives de corrélation entre des paramètres de qualité et d'autres variables plus facilement mesurables ont été rapportées dans la littérature. Aucune corrélation vraiment précise n'a été observée et les conclusions de ces études sont plutôt pessimistes quant aux chances d'en obtenir. Il nous semble toutefois que ces auteurs recherchaient des relations qui soient suffisamment stables pour permettre de mesurer indirectement la qualité, à partir de la détermination de paramètres aisément mesurables.

Cependant, dans l'optique d'un contrôle en temps réel, une simple estimation de la qualité pourrait s'avérer suffisante. Les relations entre la qualité et la quantité sont peut-être trop lâches pour permettre une mesure indirecte de la qualité, mais elles sont à notre avis suffisamment positives pour nous en donner une évaluation utile. Etant donné leur imprécision, nous n'obtiendrons toutefois qu'une prédiction approximative de la qualité. Mais comme ces relations sont aussi quasi proportionnelles, il est assuré qu'en minimisant les charges déversées en fonction de ces concentrations approximatives, on parvient du même coup à diminuer les charges réelles déversées.

Nous émettons donc l'hypothèse qu'une stratégie prédictive faisant appel à des modèles simples reliant la concentration d'un paramètre de qualité et une

variable facilement mesurable en temps réel permettrait de réduire effectivement les charges polluantes déversées en période de pluie.

Pour vérifier cette hypothèse, nous allons procéder à une série de simulations du contrôle en temps réel d'un réseau unitaire. Les résultats obtenus avec l'utilisation des modèles de prédiction de la qualité seront comparés à ceux qui auraient été obtenus avec une connaissance parfaite de cette qualité en temps réel. Ils seront également comparés aux résultats d'un contrôle réactif local dans les mêmes conditions.

Nous avons aussi identifié un autre problème en rapport avec le contrôle qualitatif en temps réel. La qualité est en effet une notion complexe qu'il n'est pas toujours facile de caractériser et son interprétation met en cause de nombreux paramètres. Doit-on minimiser les charges d'un seul paramètre ou bien minimiser un indice de qualité qui en combine plusieurs?

Il nous semble à notre avis assez difficile d'en arriver à quantifier de manière satisfaisante la qualité globale d'une eau en intégrant l'ensemble de ses caractéristiques les plus significatives. De plus, l'utilisation des indices de qualité à des fins de contrôle peut se révéler problématique. D'une part, la solution obtenue ne sera optimale pour aucun des paramètres inclus dans l'indice; et d'autre part, le nombre élevé de paramètres devant être évalués pour déterminer cet indice pose un problème technologique important. Nous croyons donc justifié d'éliminer l'approche faisant intervenir les indices de qualité.

Notre seconde hypothèse est qu'il suffit de contrôler les charges d'un seul de ces paramètres. Les corrélations entre les différents paramètres de qualité sont généralement positives et en choisissant judicieusement le paramètre de contrôle, on devrait réussir à obtenir une assez bonne minimisation des charges déversées de l'ensemble des paramètres. Il nous semble en effet logique de supposer que si le paramètre décisionnel retenu est corrélé de quelque façon que ce soit avec un ou plusieurs autres paramètres de qualité, la réduction de sa charge déversée sera accompagnée de la réduction de la charge du ou des autres paramètres concernés. Ainsi, en ne contrôlant en apparence qu'un seul paramètre, on peut arriver à en contrôler indirectement plusieurs.

Pour effectuer le choix de ce paramètre clé, nous allons entre autres avoir recours à des simulations de contrôle. Ainsi, en comparant les charges déversées de chacun des paramètres lors d'un contrôle basé sur chacun d'eux à tour de rôle, nous pourrons alors en arriver à identifier le paramètre qui est le plus susceptible de procurer la meilleure réduction globale des charges polluantes rejetées.

Comme ces deux hypothèses vont être testées au moyen de simulations, nos principaux outils de travail seront des modèles, des programmes, ainsi que des données. Avant de présenter les résultats qui ont été obtenus, nous allons d'abord décrire les différents éléments qui ont servi à bâtir le système de simulation du contrôle.

CHAPITRE IV

4. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Pour effectuer les simulations nécessaires à la vérification des hypothèses proposées dans cette étude, nous avons développé tout un système de modèles et de programmes. Dans ce chapitre, nous allons décrire le fonctionnement de chacun de ces éléments et nous présenterons également un compte rendu des travaux qui ont été accomplis pour maximiser les performances de ce système. Ces détails sont importants car ils permettent de bien situer le cadre expérimental de nos simulations.

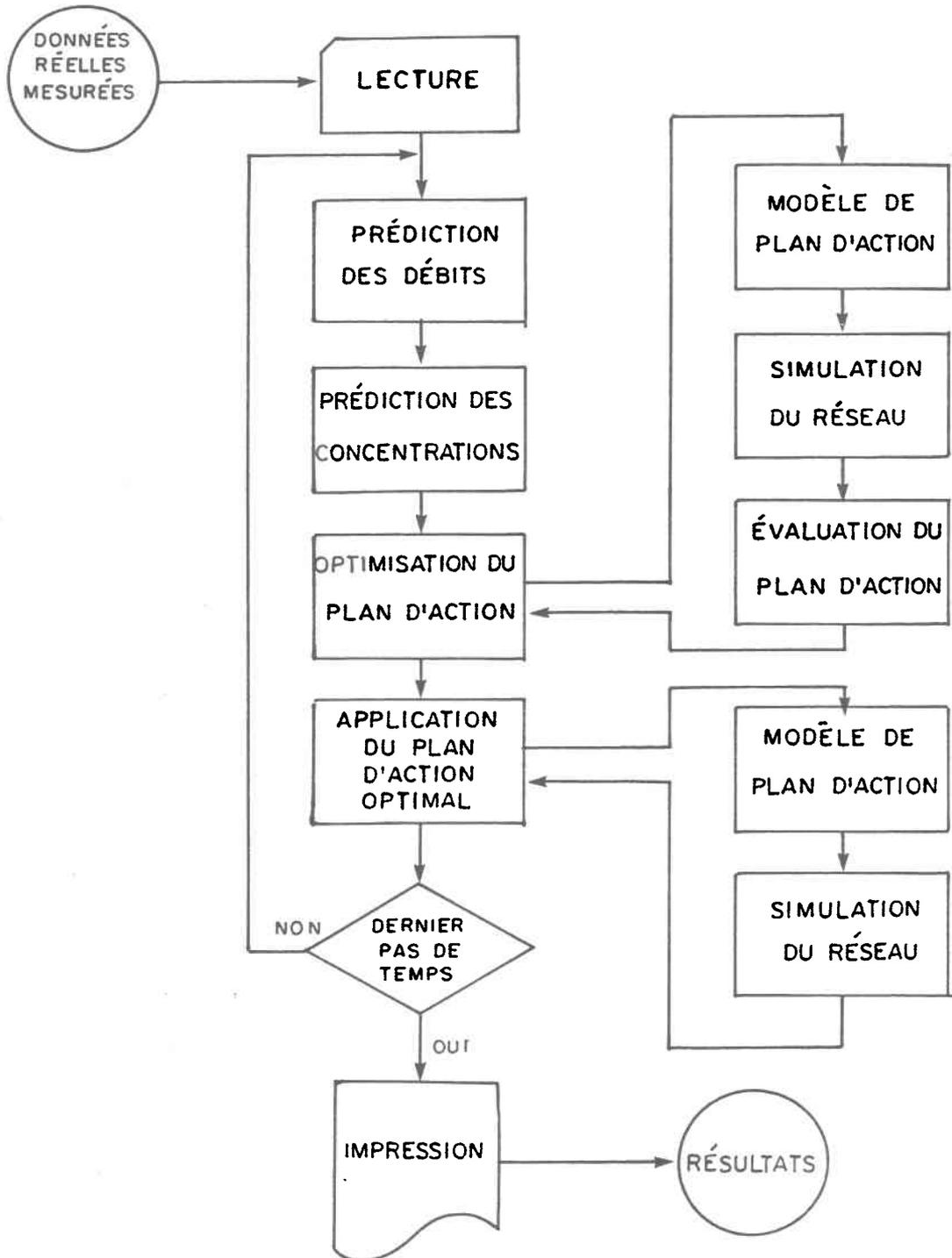
Les éléments requis pour bâtir un système complet de simulation du contrôle en temps réel sont les suivants:

- un modèle de transfert en réseau
- un modèle de prédiction des débits
- un modèle de prédiction des concentrations
- un optimisateur
- un modèle de plan d'action
- une méthode d'évaluation du plan d'action
- des données réelles mesurées (hydrogrammes et pollutogrammes concomitants pour des bassins dont les caractéristiques physiques sont connues)

Ces éléments ont été assemblés dans un logiciel modulaire dont la structure reflète la logique d'une stratégie prédictive intégrée. Ce logiciel, appelé PREDIC, est décrit plus en détail à l'annexe A. On peut remarquer sur la **figure 4.1** que le modèle de simulation du transfert en réseau est employé à deux fins. Il sert d'abord à l'optimisation du plan d'action, où il utilise les débits et les concentrations prédits. Il sert ensuite à l'application du plan d'action optimal, où alors ce sont les débits et les concentrations mesurés qui sont utilisés.

Figure 4.1

Schéma de la structure du système de simulation



4.1 Les données utilisées

Pour assurer une certaine vraisemblance aux résultats de nos simulations, nous utilisons des données réelles qui ont été mesurées à l'intérieur d'un réseau pendant un événement pluvieux. Ces données proviennent d'une campagne d'échantillonnage réalisée par le MENVIQ sur le territoire de la ville de Québec au cours de l'été 1982. La **figure 4.2** donne une idée de l'étendue et de la localisation du réseau unitaire étudié.

Lors de cette campagne, l'échantillonnage des eaux unitaires a été effectué manuellement au niveau de chacune des structures de régulation, pendant que le débit était mesuré à l'aide de la méthode de dilution à la Rhodamine. L'intervalle d'échantillonnage était de 5 minutes durant la phase de croissance des débits et il était plus grand en phase de récession. Les principaux paramètres physico-chimiques analysés étaient les MES, la DCO, le Cu, le Pb et le Zn. D'autres paramètres ont aussi été analysés, mais de façon moins systématique.

Figure 4.2

Emplacement des bassins sur le territoire



Pour la mise au point du système de simulation, nous avons choisi d'utiliser les données de l'averse du 22 juin 1982 car elles étaient plus continues. Les intervalles manquants ont été comblés par des interpolations linéaires, de façon à obtenir des données espacées de 5 minutes sur une durée totale de 130 minutes. Ces données sont présentées à l'**annexe A**. Les données de quatre autres événements pluvieux survenus au cours de l'été 1982 ont également été utilisées pour certaines simulations. Les caractéristiques de ces différents événements, telles que présentées au **tableau 4.1**, ont été enregistrées par deux pluviomètres installés sur le territoire étudié, l'un au nord de la rivière Saint-Charles et l'autre, au sud.

Tableau 4.1 Caractéristiques des événements pluvieux

PLUIE	DATE (82)	HAUTEUR (mm)	DUREE (h)	Imax ₅ (mm/h)
PLUVIOMETRE SUD				
1	21 juin	5.3	5.0	3.2
2	22 juin	4.2	1.3	10.7
3	7 juillet	11.2	0.5	45.5
4	28 juillet	46.8	15.0	36.9
5	23 août	10.7	6.0	5.9
PLUVIOMETRE NORD				
1	21 juin	4.6	5.0	2.7
2	22 juin	6.8	1.8	10.7
3	7 juillet	6.9	0.5	42.3
4	28 juillet	48.3	15.5	32.8
5	23 août	10.9	6.0	3.8

Les simulations ont été réalisées sur une portion du réseau unitaire de la ville de Québec, plus précisément sur la section d'intercepteur située sur la rive sud de la rivière Saint-Charles, et à laquelle aboutissent les collecteurs des bassins 10, 11, 12, 14 et 16. Cependant, en raison de la non-disponibilité des données relatives aux bassins 10 et 16, nous avons dû utiliser en remplacement celles de deux autres bassins situés au nord de la rivière. Ainsi, les données des bassins 10 et 16 ont été formées à partir de celles des bassins 2 et 7 respectivement. Les valeurs des débits ont simplement été corrigées en fonction des superficies des bassins substitués.

D'une longueur de 3170 m, l'intercepteur simulé est donc alimenté par cinq régulateurs qui permettent de contrôler les déversements. Les caractéristiques de chacun des bassins, de même que celles des tronçons de l'intercepteur, sont données aux **tableaux 4.2 et 4.3**.

Tableau 4.2 **Caractéristiques des bassins**

BASSIN	2	7	11	12	14
IMPERMEABILITE (%)	62	86	44	53	69
SUPERFICIE (km ²)	0.70	0.61	1.02	1.81	0.32
TEMPS DE CONCENTRATION (min)	20.5	23.7	41.1	26.1	12.4
OCCUPATION DU SOL (%)					
institutionnel	10	12	10	12	29
résidentiel	60	77	27	53	52
commercial	23	2	3	12	8
industriel	3	-	48	3	-
espaces verts	4	9	12	21	11

Tableau 4.3 **Caractéristiques de l'intercepteur du réseau de Québec**

TRONCON	LONGUEUR (m)	DIAMETRE (mm)	PENTE	CAPACITE (L/s)
1	1024	915	0.0030	1097.1
2	573	760	0.0051	872.0
3	500	1220	0.00085	1257.7
4	573	1375	0.00115	2012.5
5	500	1675	0.00115	3406.4

Comme nous ne connaissons pas l'hydrogramme amont aboutissant au premier régulateur, nous avons supposé un débit amont constant et égal à la capacité de la conduite reliée au premier tronçon de l'intercepteur. Ce débit, d'une valeur de 372.1 L/s, correspond à la capacité d'une conduite de 610 mm de diamètre et dont la pente est de 0.003. Avec un tel apport, les régulateurs amont ne seront pas favorisés. Ce même débit a été utilisé comme valeur initiale (débit de base) pour l'ensemble de l'intercepteur.

La portion du réseau de Québec desservant les bassins choisis est actuellement dimensionnée de façon telle, que la pluie utilisée ne produit des débordements qu'à seulement deux régulateurs, soit les deuxième et troisième. En conséquence, les possibilités de transferts entre régulateurs sont assez limitées, de telle sorte que le contrôle intégré est pratiquement inopérant.

C'est la raison pour laquelle nous avons dû recourir à un intercepteur fictif pour conduire les simulations de contrôle. Celui-ci a été dimensionné de façon à y observer des débordements substantiels à chacun des régulateurs. Pour ce faire, nous avons d'abord identifié, pour chacun des cinq collecteurs, le débit maximal mesuré au cours de l'événement. Nous avons ensuite estimé que chaque tronçon de l'intercepteur devait avoir une capacité suffisante pour recueillir la moitié de ce débit de pointe. Ces apports ont été cumulés d'amont en aval, incluant un apport amont de 372.1 L/s, afin d'établir la capacité requise de chacun des tronçons. Nous avons finalement sélectionné des diamètres de conduite et des pentes y déterminant une capacité qui soit la plus rapprochée possible de la capacité désirée. Les résultats de ces calculs sont présentés au **tableau 4.4**.

Tableau 4.4 **Caractéristiques de l'intercepteur du réseau fictif**

TRONCON	LONGUEUR (m)	DIAMETRE (mm)	PENTE	CAPACITE (L/s)
1	500	915	0.0017	825.9
2	500	1220	0.00065	1099.8
3	500	1220	0.0015	1670.7
4	500	1525	0.00063	1963.2
5	500	1525	0.00092	2372.4

4.2 Le modèle de transfert en réseau

Dans la plupart des études traitant du contrôle en temps réel, le transfert en réseau est simulé de façon très simplifiée en ne faisant intervenir qu'un délai pur dans la propagation des hydrogrammes. Ainsi, dans la méthode dite "time lag routing" utilisée par Nguyen Van et Osseyrane (1987), on pose l'hypothèse que l'hydrogramme ne subit aucune modification durant son transport dans l'intercepteur, c'est-à-dire qu'il est propagé sans qu'il y ait atténuation de son maximum. La vitesse d'écoulement en conduite étant assumée constante, le temps de parcours entre deux régulateurs est donc indépendant du débit et est uniquement fonction de la distance qui sépare les deux ouvrages. En conséquence, il est possible

d'optimiser le contrôle de ces systèmes à l'aide des méthodes de la programmation dynamique.

Par souci de représentativité, nous avons préféré utiliser dans cette étude un modèle de transfert non-linéaire, capable de simuler le laminage observé dans les systèmes réels. Ce processus de laminage est causé par l'emmagasinement de l'eau dans les tronçons. Par exemple, lorsque le débit augmente, le niveau de l'eau dans le tronçon augmente, et du même coup, l'emmagasinement augmente également. Cet accroissement de l'emmagasinement utilise une partie des apports amont et c'est pourquoi le débit aval ne croît pas aussi vite. Le phénomène inverse est observé durant la décrue. Le laminage produit donc une atténuation des variations de débit. A la sortie d'un tronçon, ces variations sont amorties et étirées, d'où le parallèle avec le "laminage".

Notre modèle repose sur un algorithme de transfert par onde cinématique (kinematic wave routing), c'est-à-dire qu'il est basé sur une simplification des équations de Saint-Venant décrivant l'écoulement transitoire à surface libre. Nous résolvons simultanément les équations du bilan de masse et du bilan d'énergie, cette dernière étant calculée à l'aide de l'équation de Manning pour les écoulements stationnaires. Ces deux équations sont discrétisées au moyen d'un schéma de différences finies fort simple, où les tronçons de conduite entre les régulateurs constituent les éléments, et les régulateurs constituent les noeuds. Nous obtenons ainsi une équation algébrique implicite permettant, à chaque pas de temps, de calculer le débit aval d'un élément à partir du débit amont et du débit aval

précédent. Cette équation implicite est résolue à l'aide de la méthode itérative de Newton qui converge très rapidement.

Le choix d'un tel algorithme de transfert est motivé par le fait que notre modèle a pour but de simuler un système réel. Il est donc important d'avoir recours à un algorithme capable de représenter le phénomène du laminage car les processus d'emménagement à l'intérieur des conduites vont avoir une incidence directe sur les résultats du contrôle.

Enfin, le modèle permet également de simuler le transfert des polluants dans l'intercepteur. Ce calcul n'est pas nécessaire à l'optimisation des plans d'action, mais il permettra éventuellement de quantifier l'impact sur l'usine de traitement de l'implantation d'un système de contrôle en temps réel du réseau. Ce transfert est calculé à l'aide d'une discrétisation par différences finies de l'équation de conservation de la masse. On obtient ainsi, de manière explicite et pour chaque pas de temps, la concentration aval de chaque tronçon à partir de la concentration amont et de la concentration aval antérieure.

4.3 Le modèle de prédiction des débits

Le contrôle prédictif intégré est basé sur la simulation du comportement futur du réseau. Comme le modèle de transfert utilise les débits issus des collecteurs comme données d'entrée, il nous faut donc un modèle pour calculer les débits attendus à chacun des régulateurs.

Dans le cadre d'un contrôle en temps réel des réseaux unitaires, il a été constaté que les modèles empiriques de prédiction des débits étaient les outils les mieux adaptés (Patry, 1982). Ils ont un temps de calcul très court, se contentent de peu d'informations et peuvent être réajustés au fur et à mesure du déroulement du contrôle. De plus, ils permettent l'utilisation directe de données disparates (pluviographe, radar, ...)

La plupart de ces modèles empiriques nécessitent généralement la connaissance préalable de certaines données météorologiques. Comme nous ne disposons malheureusement pas de données suffisamment complètes pour nous permettre de préparer un modèle qui soit aussi performant, nous avons jugé qu'il était préférable d'abandonner cette approche.

Cette décision nous semble d'autant plus valable que notre objectif est de comparer les performances respectives de différents modèles de prédiction de la qualité, et ce, sur la base de la charge polluante déversée lors du contrôle. Il est en

effet à prévoir que les imprécisions d'un modèle de prédiction des débits viennent interférer avec celles des modèles de prédiction des concentrations, ce qui nous empêcherait d'évaluer adéquatement la performance de ces derniers.

En conséquence, pour faciliter l'interprétation des résultats, nous avons renoncé à l'emploi d'un modèle de prédiction des débits. Nous allons donc utiliser directement les valeurs réelles mesurées du débit lors des simulations de contrôle.

4.4 Le modèle de plan d'action

Dans une stratégie prédictive intégrée, on fait appel à un plan d'action pour assigner, à chaque pas de temps, le débit de consigne que chaque contrôleur doit maintenir dans l'intercepteur. Ce plan d'action est donc constitué d'un ensemble de paramètres qui définissent la suite des ordres de contrôle s'appliquant à chacun des régulateurs pour toute la durée de l'horizon de prédiction.

Dans un contrôle réactif local, le débit de consigne des contrôleurs est égal à la capacité de l'intercepteur, ce qui assure une minimisation des volumes déversés. Dans un contrôle prédictif intégré basé sur la minimisation des charges polluantes, il est par contre possible d'augmenter volontairement les déversements à un

régulateur donné, causant ainsi une sous-utilisation temporaire d'un tronçon de l'intercepteur. La capacité qui est alors libérée pourra être utilisée un peu plus tard par un régulateur situé en aval, ce qui aura pour effet d'y réduire les déversements. Ce transfert est avantageux lorsque la concentration des eaux collectées est plus grande au collecteur aval qu'au collecteur amont. Ainsi, le fait de rejeter un volume plus grand d'eaux peu chargées en amont va permettre de rejeter un volume moins grand d'eaux fortement chargées en aval, ce qui va résulter globalement en une diminution de la charge totale déversée.

Nous avons constaté que le moyen le plus sûr de commander de tels transferts est d'assigner, à partir d'un système de contrôle central, la consigne des différents contrôleurs. A chaque régulateur, le débit de consigne à respecter dans l'intercepteur n'est plus fixé à la capacité de ce dernier, mais est plutôt variable. Sa valeur est déterminée par le modèle de plan d'action, et elle varie entre 0 L/s et la capacité maximale du tronçon.

Le modèle de plan d'action est donc utilisé pour définir les variables de contrôle du système. Sa formulation la plus simple est celle où les paramètres à optimiser sont directement les consignes des contrôleurs, pour chacun des pas de temps de l'horizon de prédiction. Ce modèle détaillé est plus précis et les bornes d'optimisation sont faciles à déterminer. Cependant, le nombre de paramètres nécessaires pour décrire le plan d'action augmente rapidement à mesure que s'allonge la durée de la période de prédiction.

4.5 La méthode d'optimisation

Le système que nous considérons n'étant pas linéaire, nous devons par conséquent utiliser une méthode d'optimisation qui nous permette de trouver le minimum d'une fonction non-linéaire de plusieurs variables.

Le plan d'action qui doit être optimisé est décrit à l'aide de paramètres. Pour le modifier, il suffit donc de changer la valeur de ces derniers. Lorsqu'un plan d'action est testé par l'optimisateur, les valeurs des paramètres qui le constituent sont utilisées par le modèle de transfert en réseau, afin de simuler le comportement du système lorsque soumis à ce plan d'action. Une valeur de fonction objectif est ensuite calculée, permettant ainsi de quantifier la performance du plan à l'essai. Cette appréciation est retournée à l'optimisateur, lequel va alors modifier en conséquence les valeurs des paramètres du plan d'action. Les nouveaux plans, qui vont être essayés successivement, sont choisis au moyen d'un algorithme plus ou moins empirique tout dépendant de la méthode d'optimisation employée.

4.5.1 Choix de la méthode

Dans cette étude, trois méthodes d'optimisation ont été essayées. Nous avons d'abord utilisé la méthode du SIMPLEX de Nelder et Mead (1965) qui est un algorithme de recherche directe très efficace. Cette méthode a l'avantage de s'accommoder de fonctions objectif comprenant des discontinuités, mais sa convergence est lente en fin d'optimisation. En second lieu, nous avons essayé la méthode de recherche proposée par HOOKE et JEEVES (1961). D'une très grande simplicité, cette dernière est particulièrement efficace dans les problèmes d'optimisation où les variables sont relativement indépendantes. La troisième technique utilisée, soit celle des gradients conjugués de POWELL (1965), est probablement la plus performante des trois méthodes. Elle procure une convergence très rapide et de plus, elle est très précise, surtout en fin d'optimisation. Cependant, des discontinuités dans la fonction objectif peuvent faire échouer la méthode de POWELL.

Ces trois algorithmes sont adaptés à des problèmes d'optimisation sans contraintes. Cependant, dans le cadre du contrôle, le plan d'action doit respecter certaines contraintes qui sont inhérentes à l'hydraulique du réseau. Il est possible d'appliquer ces contraintes au moyen de pénalités ajoutées à la fonction objectif. C'est la façon la plus simple de procéder, mais il en résulte des discontinuités dans la fonction objectif. En effet, les pénalités sont appliquées à la limite de la zone permise pour les valeurs des paramètres, et si l'optimum recherché est situé à

proximité de cette limite, il sera très difficile de le localiser. Cette situation correspond justement au cas du contrôle prédictif intégré car bien souvent, le plan d'action optimal est assez près de celui du contrôle réactif local, lequel constitue en quelque sorte le plan d'action limite, puisque les consignes qui le constituent sont égales aux bornes supérieures permises pour les paramètres (capacité maximale des tronçons).

C'est pourquoi nous avons préféré définir les limites du problème à l'aide d'une fonction de transformation du domaine d'optimisation (Box, 1966). Il s'agit d'une fonction arbitraire qui permet à l'optimisateur de travailler avec des valeurs de paramètres qui sont non-bornées, alors que les valeurs réelles sont limitées. Soit u , la limite supérieure d'une variable x et l , sa limite inférieure. Pour que l'optimisation soit effectuée sur les variables internes y non-bornées, lesquelles sont reliées aux variables externes réelles x bornées, il suffit d'avoir recours à la fonction de transformation suivante:

$$x = l + (u - l) \sin^2 y$$

A) Première expérience

Pour évaluer la performance de ces trois méthodes d'optimisation, nous avons effectué cinq séries de simulations. Dans chacune d'entre elles, l'objectif du contrôle consistait à minimiser les charges déversées de l'un des paramètres de qualité suivants : les MES, la DCO, le Cu, le Pb et le Zn; et ce, pour des horizons de prédiction variant entre 1 et 10 pas de temps. Les résultats de ces simulations sont présentés aux **tableaux 4.5 à 4.9**. Pour en avoir une illustration, nous avons également tracé les graphiques correspondants. Les **figures 4.3 à 4.7** nous montrent donc l'évolution de la charge totale déversée du paramètre de contrôle considéré en fonction de la longueur de l'horizon de prédiction utilisé pour la détermination du plan d'action optimal.

A l'examen de ces graphiques, il nous apparaît évident que la méthode du **SIMPLEX** est significativement moins performante que les deux autres, puisque le contrôle qui en résulte entraîne le rejet d'une charge polluante beaucoup plus élevée. Et ce, quelque soit le paramètre de qualité sur lequel sont basées les décisions de contrôle ou la longueur de l'horizon de prédiction utilisé. Il nous faut donc choisir entre la méthode de **POWELL** et celle de **HOOKE**.

Tableau 4.5 Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle MES lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

HP	POWELL	HOOKE	SIMPLEX
1	264.3991	264.4781	293.6726
2	243.9477	250.8699	286.4702
3	237.8929	242.5254	267.5789
4	236.9193	240.7448	263.8965
5	236.6219	237.1964	251.5968
6	236.1776	235.4855	252.7618
7	244.8342	235.1790	252.8110
8	235.9791	235.4941	252.3167
9	240.9453	235.4941	254.2714
10	243.8315	235.4940	252.0167

Tableau 4.6 Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle DCO lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

HP	POWELL	HOOKE	SIMPLEX
1	240.1268	241.4527	245.2418
2	232.1085	237.5151	237.8685
3	229.9090	233.0004	233.5527
4	231.9228	227.6166	232.8035
5	230.9652	230.4571	231.8440
6	232.4633	230.5693	232.8422
7	239.2737	227.5012	234.1132
8	226.6433	228.3339	233.8129
9	237.5325		235.4922
10	229.0007		236.5832

Tableau 4.7 Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle Cu lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

HP	POWELL	HOOKE	SIMPLEX
1	0.1475	0.1475	0.1528
2	0.1413	0.1413	0.1508
3	0.1403	0.1416	0.1484
4	0.1404	0.1417	0.1454
5	0.1388	0.1418	0.1471
6	0.1393		0.1428
7	0.1390		0.1424
8	0.1394		0.1421
9	0.1396		0.1418
10	0.1393		0.1417

Tableau 4.8 Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle Pb lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

HP	POWELL	HOOKE	SIMPLEX
1	0.3125	0.3116	0.3423
2	0.2962	0.3006	0.3397
3	0.2895	0.2897	0.3258
4	0.2982	0.2897	0.3233
5	0.2895	0.3030	0.3222
6	0.2895	0.3030	0.3099
7	0.2890		0.3139
8	0.2920		0.3113
9	0.2974		0.3114
10	0.2974		0.3161

Tableau 4.9

Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle Zn lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

HP	POWELL	HOOKE	SIMPLEX
1	0.8572	0.8577	0.8841
2	0.8168	0.8226	0.8816
3	0.7879	0.7974	0.8484
4	0.7825	0.7886	0.8439
5	0.7828	0.7838	0.8127
6	0.7830	0.7838	0.8217
7	0.7830	0.7849	0.8200
8	0.7830		0.8193
9	0.7830		0.8140
10	0.7841		0.7998

Figure 4.3

Charges déversées du paramètre de contrôle MES lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

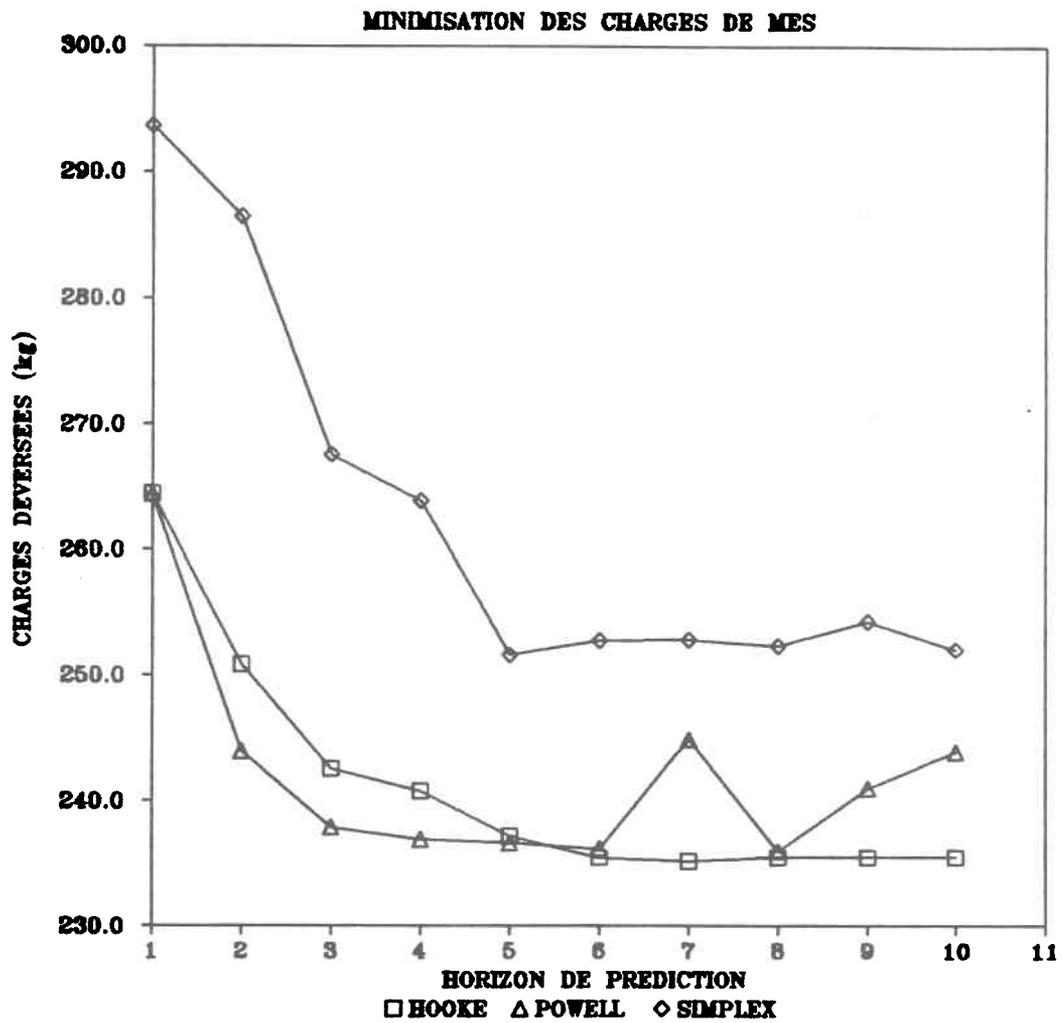


Figure 4.4

Charges déversées du paramètre de contrôle DCO lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

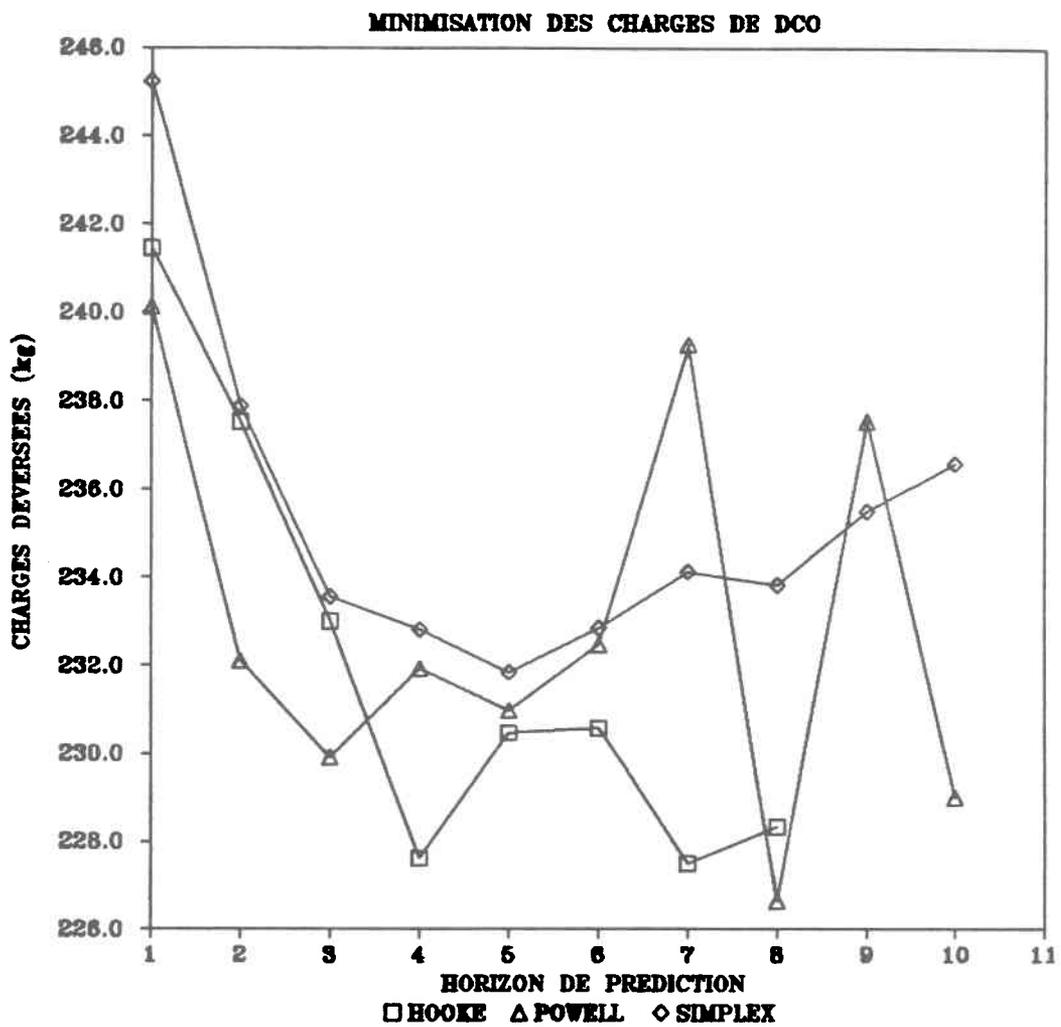


Figure 4.5

Charges déversées du paramètre de contrôle Cu lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

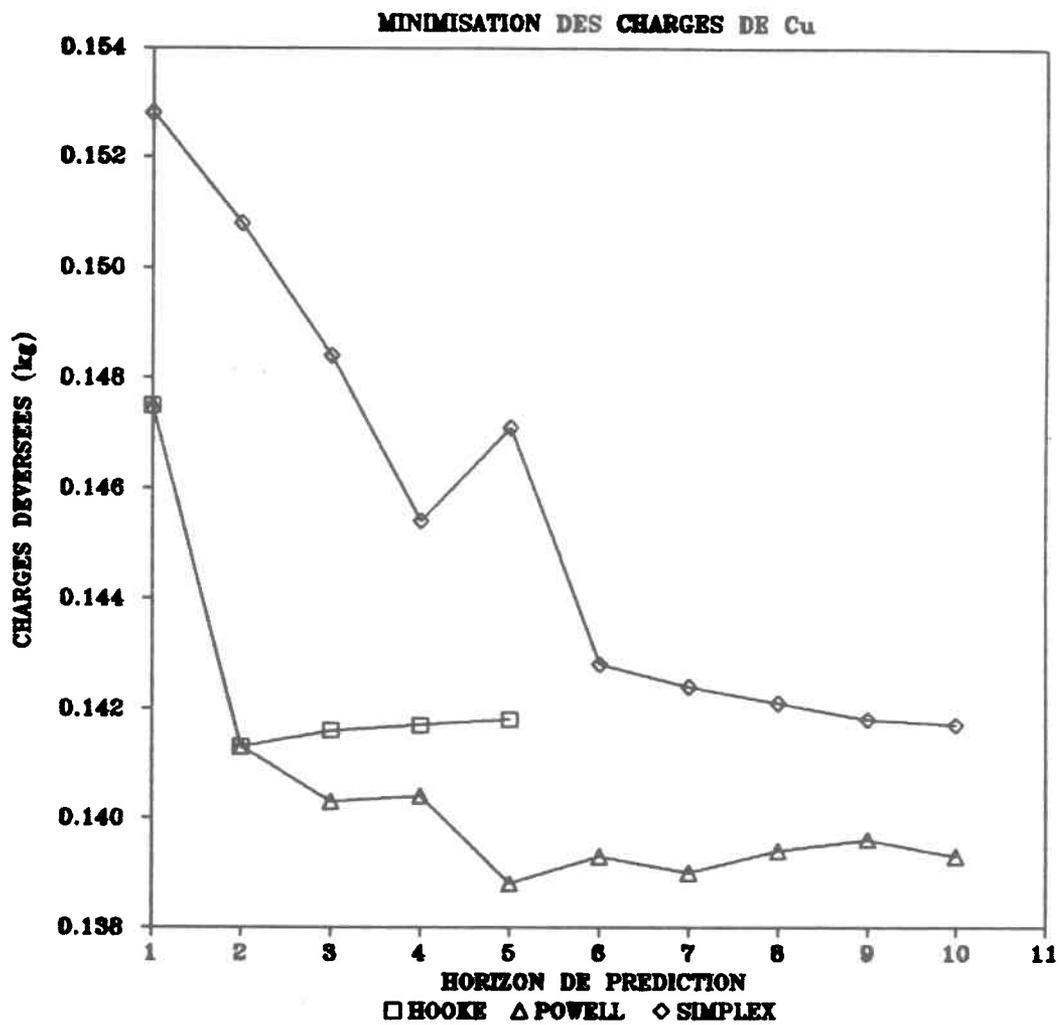


Figure 4.6

Charges déversées du paramètre de contrôle Pb lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées

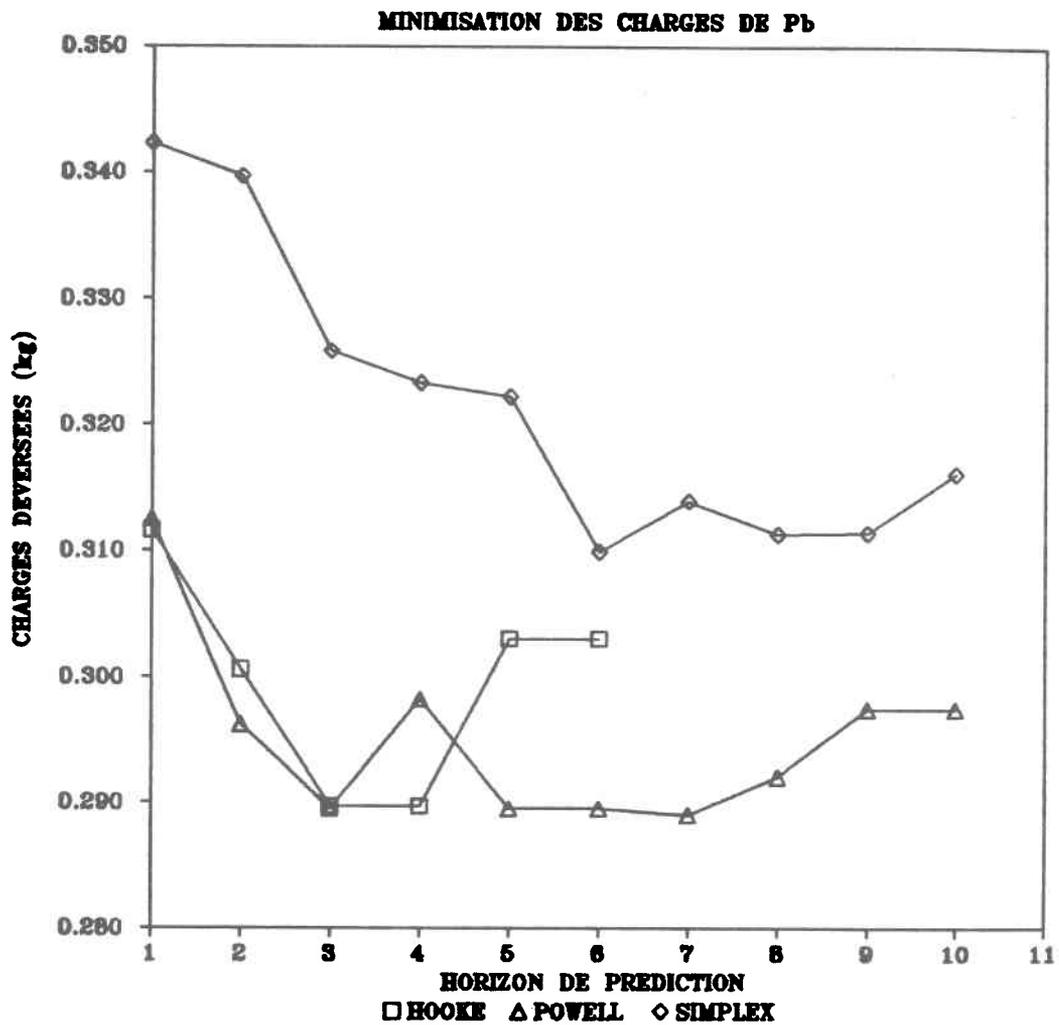
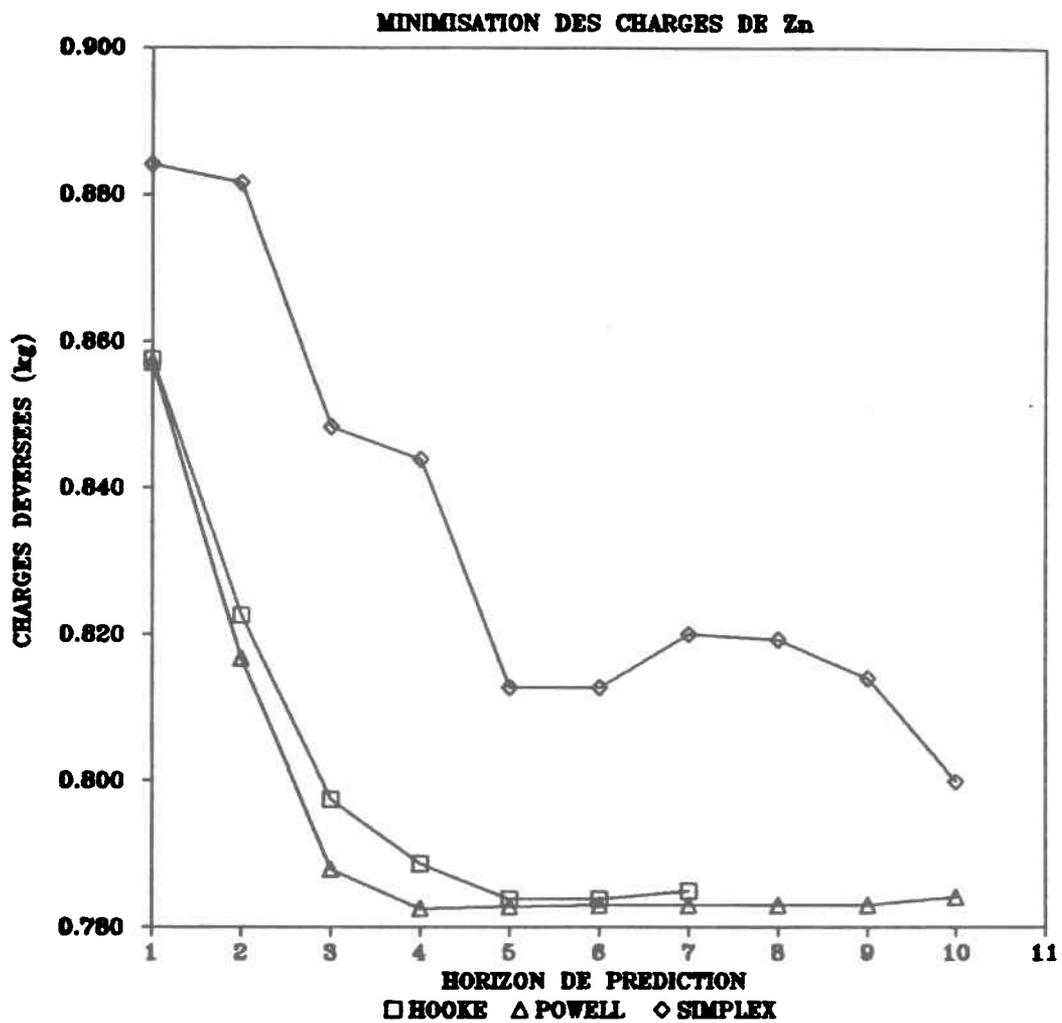


Figure 4.7

Charges déversées du paramètre de contrôle Zn lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les trois méthodes d'optimisation essayées



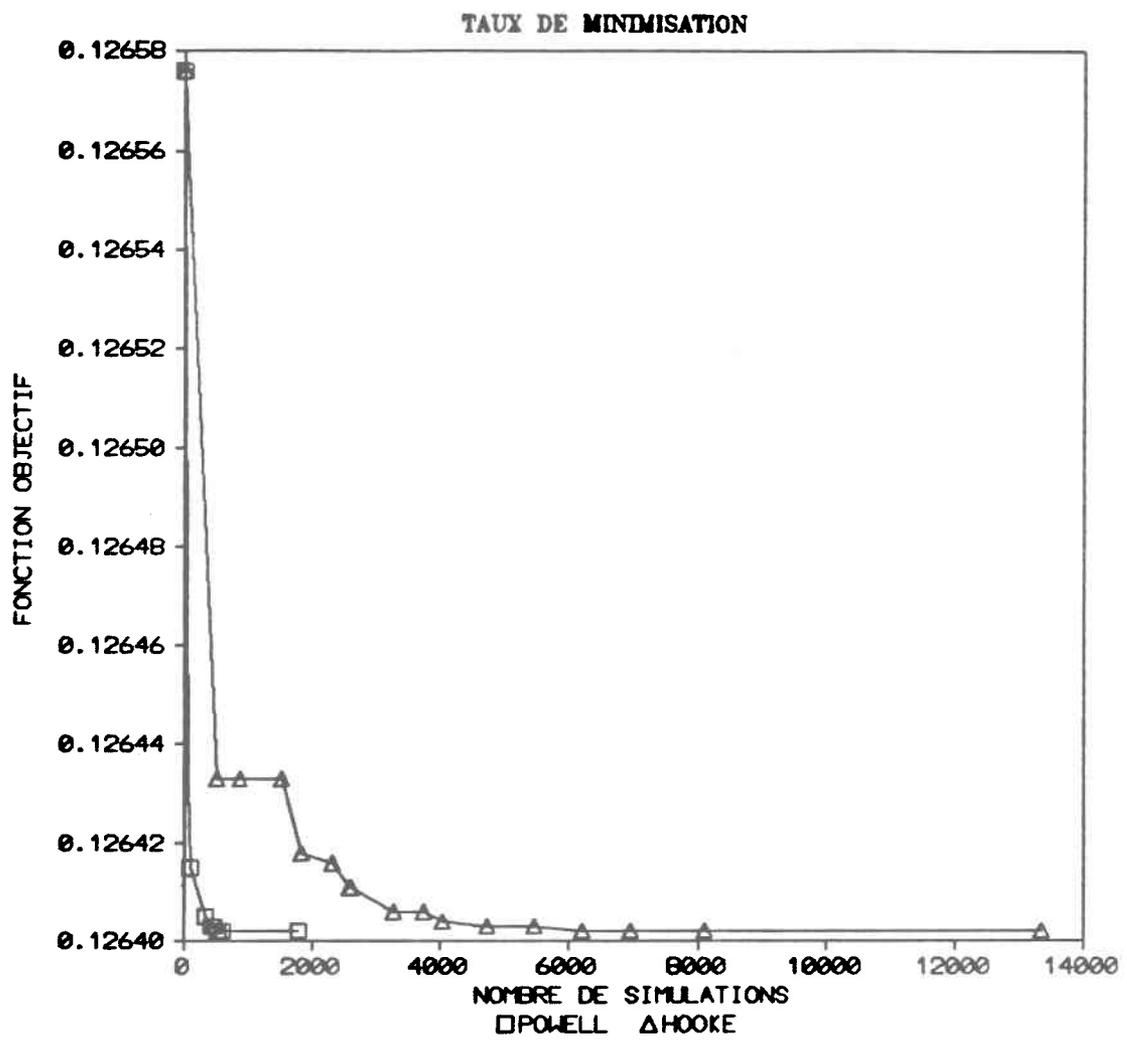
B) Deuxième expérience

Comme on peut le constater d'après ces graphiques, les méthodes de HOOKE et de POWELL ont obtenu des résultats passablement équivalents, et la différence observée n'est pas suffisamment significative pour baser notre choix. Il faut cependant noter que ces optimisations ont été très longues, certaines d'entre elles ayant requis plusieurs heures de temps CPU. Ces durées sont évidemment incompatibles avec un contrôle en temps réel où les décisions doivent être prises rapidement. C'est pourquoi, pour départager ces deux méthodes, nous avons fait une expérience dans le but d'évaluer leur vitesse de convergence. Les résultats en sont illustrés à la **figure 4.8**.

Ce graphique représente la convergence de la fonction objectif lors de l'optimisation du plan d'action correspondant au 6^{ème} pas de temps de l'événement. Le contrôle simulé visait à minimiser la charge totale de MES déversée pour un horizon de prédiction de 3 pas de temps. On y voit qu'en terme de rapidité, la méthode de POWELL est beaucoup plus performante que celle de HOOKE. On remarque également qu'avec la méthode de POWELL, la fonction objectif atteint très rapidement sa valeur minimale et qu'ensuite, l'optimisation se poursuit sans gain appréciable. Au vu de ces résultats, il nous semble donc logique d'opter pour la méthode de POWELL.

Figure 4.8

Taux de minimisation de la fonction objectif en fonction du nombre de simulations effectuées, pour les méthodes de HOOKE et de POWELL



4.5.2 Choix du critère de convergence

Dans toutes les optimisations qui ont été effectuées jusqu'à présent, nous avons toujours utilisé un critère de convergence très sévère de façon à s'assurer que la méthode soit la plus précise possible. Cependant, les temps de calcul nécessaires étant beaucoup trop longs pour être applicables à un contrôle en temps réel, nous avons cherché à déterminer un critère qui soit moins sévère, mais tout aussi valable.

Pour ce faire, nous avons examiné en détail le processus de convergence de la fonction objectif, soit itération par itération. Tel que noté précédemment, la méthode de Powell converge très rapidement, pratiquement au tout début de l'optimisation. Toutefois, le nombre d'itérations qui sont nécessaires à la minimisation (stabilisation) de la fonction objectif augmente avec la durée de l'horizon de prédiction.

Nous avons constaté que, pour le plus long horizon de prédiction utilisé, soit celui de 10 pas de temps, la convergence est atteinte après 27 itérations. Il a donc été décidé de poursuivre les optimisations ultérieures en limitant la durée des calculs à 30 itérations.

Avec ce nouveau critère de convergence, nous avons refait les cinq séries de simulations qui avaient été effectuées au moment du choix de la méthode d'optimisation. Il s'agissait alors de simuler un contrôle ayant pour objectif la

minimisation des charges déversées de chacun des paramètres de qualité, pour différentes longueurs de l'horizon de prédiction. Les **tableaux 4.10 à 4.14**, ainsi que les **figures 4.9 à 4.13** qui les accompagnent, permettent de comparer ces résultats avec ceux qui ont été obtenus précédemment avec un critère de convergence très sévère. Comme on peut le constater, les résultats sont presque identiques, en particulier lorsqu'on utilise des horizons de prédiction qui sont assez courts.

Tableau 4.10 Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle MES lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

HP	CRITERE TRES SEVERE	CRITERE MOINS SEVERE
1	264.3991	264.3991
2	243.9477	243.9477
3	237.8929	237.8929
4	236.9193	236.9193
5	236.6219	236.6220
6	236.1776	236.1776
7	244.8342	242.7889
8	235.9791	235.9791
9	240.9453	238.1755
10	243.8315	243.8315

Tableau 4.11 Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle DCO lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

HP	CRITERE TRES SEVERE	CRITERE MOINS SEVERE
1	240.1268	240.1268
2	232.1085	232.1085
3	229.9090	229.9090
4	231.9228	231.9228
5	230.9652	232.6731
6	232.4633	232.4633
7	239.2737	237.8072
8	226.6433	228.8994
9	237.5325	237.5325
10	229.0007	229.0007

Tableau 4.12 Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle Cu lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

HP	CRITERE TRES SEVERE	CRITERE MOINS SEVERE
1	0.1475	0.1475
2	0.1413	0.1413
3	0.1403	0.1403
4	0.1404	0.1404
5	0.1388	0.1388
6	0.1393	0.1393
7	0.1390	0.1390
8	0.1394	0.1394
9	0.1396	0.1396
10	0.1393	0.1393

Tableau 4.13

Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle Pb lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

HP	CRITERE TRES SEVERE	CRITERE MOINS SEVERE
1	0.3125	0.3125
2	0.2962	0.2962
3	0.2895	0.2895
4	0.2982	0.2982
5	0.2895	0.2895
6	0.2895	0.2895
7	0.2890	0.2890
8	0.2920	0.2920
9	0.2974	0.2920
10	0.2974	0.2974

Tableau 4.14

Charges déversées (kg) du paramètre de contrôle Zn lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

HP	CRITERE TRES SEVERE	CRITERE MOINS SEVERE
1	0.8572	0.8572
2	0.8168	0.8168
3	0.7879	0.7879
4	0.7825	0.7825
5	0.7828	0.7828
6	0.7830	0.7830
7	0.7830	0.7830
8	0.7830	0.7830
9	0.7830	0.7843
10	0.7841	0.7841

Figure 4.9

Charges déversées du paramètre de contrôle MES lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

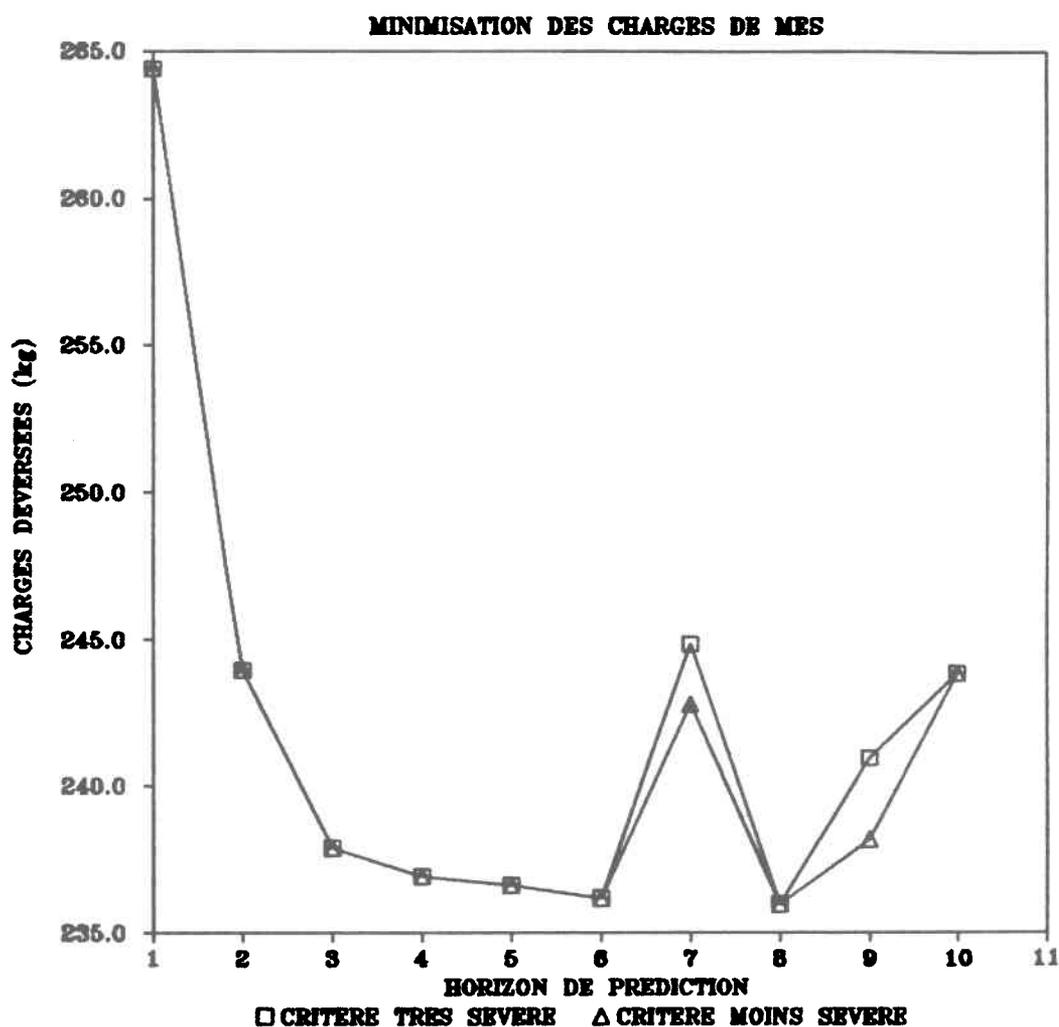


Figure 4.10

Charges déversées du paramètre de contrôle DCO lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

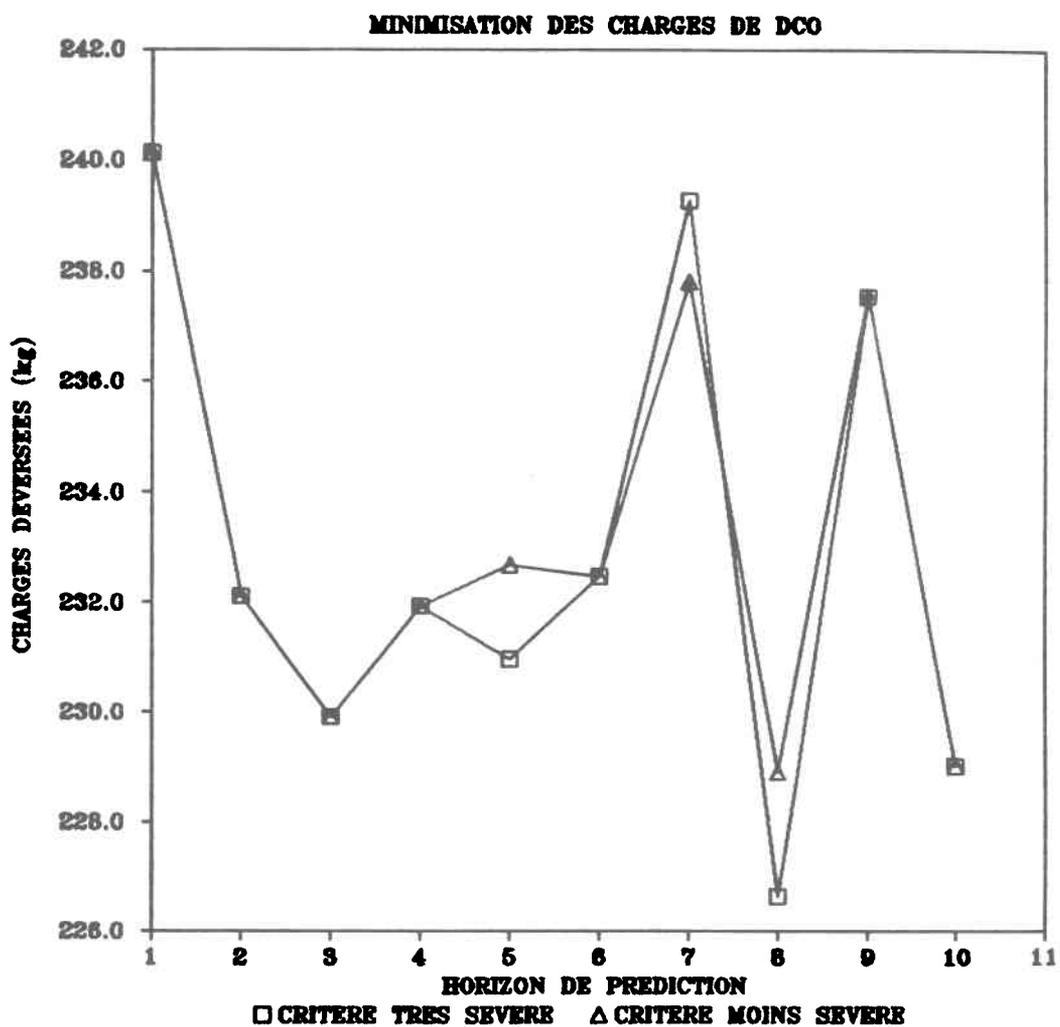


Figure 4.11

Charges déversées du paramètre de contrôle Cu lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

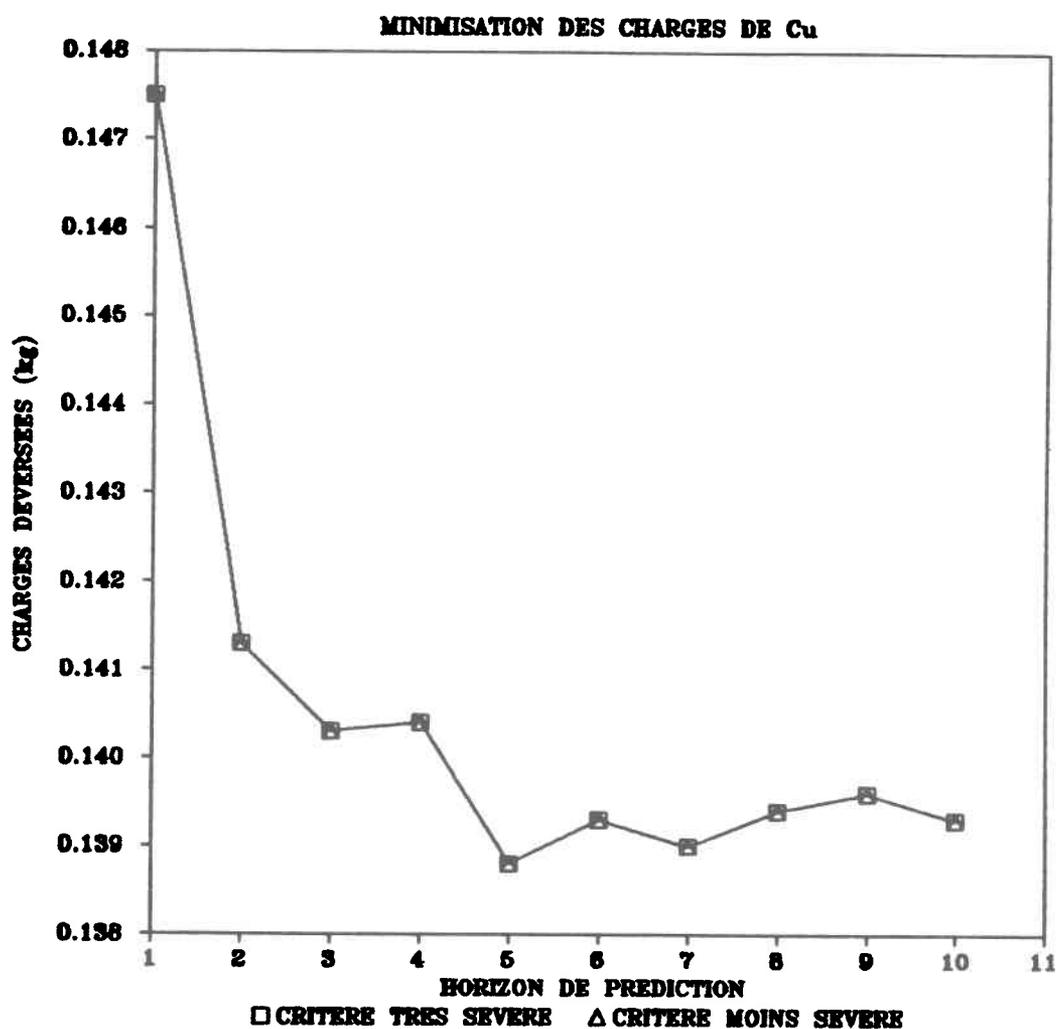


Figure 4.12

Charges déversées du paramètre de contrôle Pb lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell

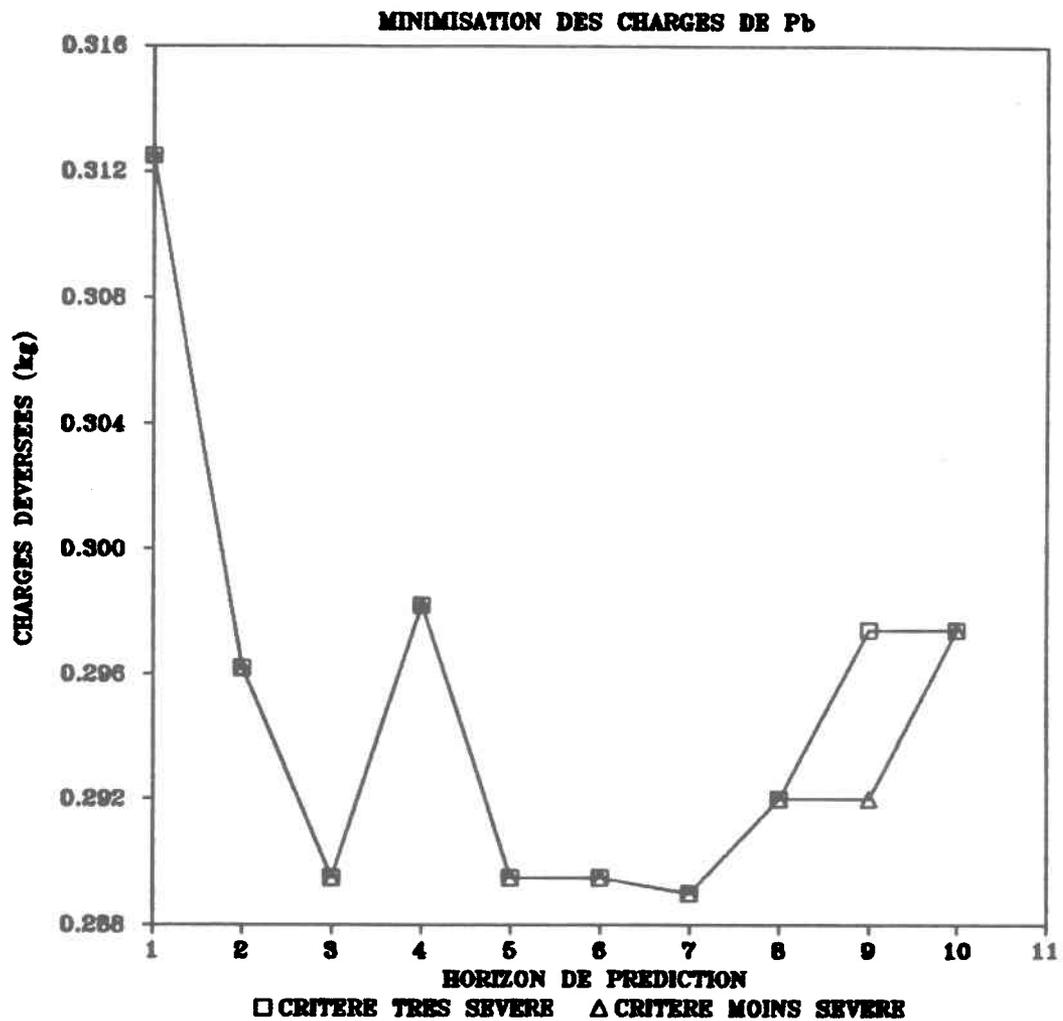
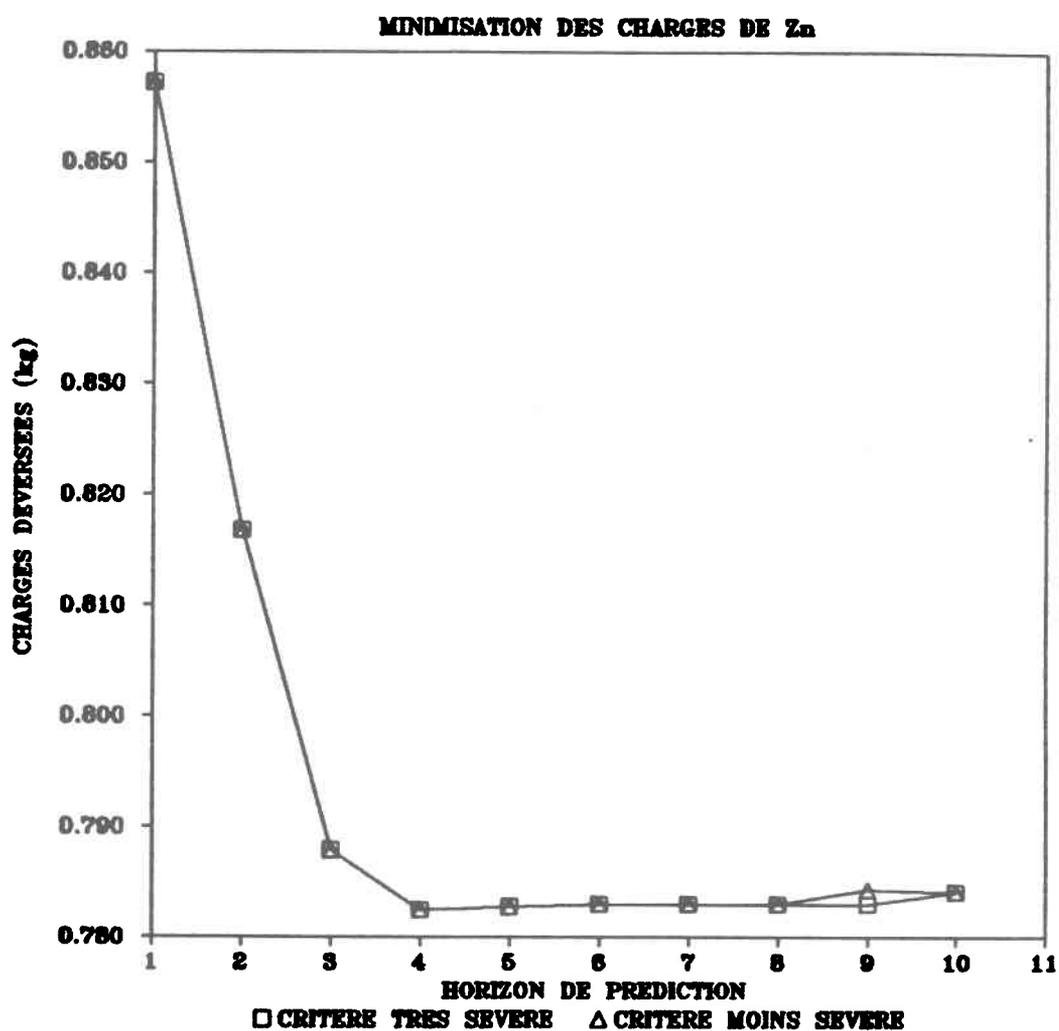


Figure 4.13

Charges déversées du paramètre de contrôle Zn lors d'un contrôle prédictif utilisant différentes longueurs d'horizon de prédiction, pour les deux critères de convergence essayés dans la méthode de Powell



4.6 L'horizon de prédiction

La mise en oeuvre d'une stratégie prédictive intégrée nécessite la détermination préalable d'un horizon de prédiction, c'est-à-dire qu'il faut établir la longueur des simulations qui serviront, à chaque pas de temps réel, à optimiser le plan d'action.

Idéalement, l'horizon de prédiction devrait être le plus long possible, ceci afin d'avoir en main le maximum d'informations au moment de la prise de décision. La possibilité de "voir" plus loin dans le futur nous permet en effet de choisir plus facilement les décisions qui s'avèrent les plus adéquates en regard des objectifs du contrôle.

Cependant, dans la pratique, il est depuis longtemps reconnu qu'il est inutile d'utiliser un horizon plus long que le temps de concentration de l'intercepteur. Celui-ci représente en quelque sorte la mémoire du système, c'est-à-dire qu'on ne peut plus observer les conséquences d'une décision quelconque passé ce laps de temps.

4.6.1 L'horizon de prédiction et le modèle de transfert en réseau

On a vu précédemment que dans un contrôle prédictif intégré basé sur la minimisation des charges polluantes déversées, on pouvait décider d'augmenter volontairement les rejets à un régulateur donné, de façon à ce que la capacité ainsi libérée puisse être utilisée par un ou plusieurs régulateurs cibles situés en aval. Comment se répercute l'effet d'une telle décision dans le cas d'un modèle de transfert par délai pur ?

Etant donné que l'hydrogramme ne subit aucune modification durant sa propagation dans l'intercepteur, l'effet d'une décision de contrôle va se faire sentir en aval de façon subite et complète après un laps de temps proportionnel à la distance parcourue et inversement proportionnel à la vitesse d'écoulement. Le régulateur aval cible concerné par cette décision ne pourra donc bénéficier de la capacité supplémentaire qui lui est allouée, qu'après un intervalle de temps égal au temps de parcours entre les deux ouvrages. Comme l'effet d'une décision de contrôle se propage vers l'aval sans déformation, les transferts de capacité ne vont donc se faire que d'un régulateur à un autre, avec uniquement un temps de décalage.

De tels transferts ne vont évidemment s'effectuer que lorsque la concentration des eaux collectées au régulateur amont, au moment du relâchement (prise de décision), est inférieure à celle au régulateur aval au moment de la

récupération de la capacité libérée. Cette situation pouvant se produire plusieurs fois au cours d'un événement pluvieux, les possibilités de transfert vont être, par conséquent, assez nombreuses.

Il est donc courant avec ce genre de modèles d'utiliser un horizon de prédiction égal au temps de parcours dans l'intercepteur. Ce faisant, on s'assure que les décisions qui sont prises au régulateur le plus en amont ont le temps de produire leur effet sur le régulateur le plus en aval, ce qui est une condition nécessaire pour obtenir un contrôle véritablement intégré, capable de saisir toutes les opportunités de transfert de capacité.

Il en va toutefois autrement dans un intercepteur réel, de même que dans un modèle de réseau où le transfert est calculé à l'aide d'un algorithme d'onde cinématique. En effet, avec un tel schéma de transfert, il est possible de simuler le laminage causé par l'emmagasinement de l'eau dans les conduites. Les hydrogrammes vont donc se propager d'amont en aval en étant déformés, puisqu'en phase de crue par exemple, une partie du débit amont est utilisée pour accroître l'emmagasinement dans le tronçon. Ainsi, lorsqu'une décision de contrôle est appliquée à un régulateur amont, l'effet de cette décision va commencer à se répercuter en aval de façon progressive. Il se produit en fait un laminage, de telle sorte qu'à la sortie du tronçon ou qu'après un certain temps, la perturbation initiale est amortie et étirée.

Avec un tel modèle de transfert, la décision d'augmenter volontairement les rejets à un régulateur donné va donc affecter les régulateurs en aval pendant

plusieurs pas de temps, puisque la capacité libérée par le régulateur amont va être, par suite du laminage, partagée en plusieurs capacités plus petites étalées dans le temps. Par conséquent, pour justifier qu'il y ait un déversement accru à un régulateur amont, il faudra que pendant plusieurs pas de temps, le ou les régulateurs cibles reçoivent une eau suffisamment chargée pour que la récupération des capacités étalées se traduise globalement par une diminution plus importante de la charge totale déversée. Une telle condition est toutefois beaucoup plus difficile à remplir que dans le cas d'un modèle par délai pur où les transferts de capacité n'impliquent seulement que deux régulateurs.

Comme l'effet du laminage devient de plus en plus marqué à mesure que le temps s'écoule, il s'ensuit que pour un horizon de prédiction très long, on va observer à la fin des simulations un étalement encore plus prononcé de la capacité libérée par le régulateur amont. Il va alors devenir difficile d'identifier un groupe de régulateurs cibles pour lequel il serait avantageux d'effectuer des transferts éloignés (en distance ou en temps), puisque ce groupe risque d'inclure plusieurs cas où il n'est pas vraiment nécessaire d'accorder une capacité supplémentaire. Ainsi, le processus de laminage rend pratiquement inutile l'emploi de longs horizons de prédiction parce que la capacité libérée initialement en amont est alors très fortement dispersée, et qu'il s'avère difficile de réaliser des transferts pouvant permettre une réduction plus importante des charges déversées.

De plus, les longs horizons de prédiction sont également victimes de l'imprécision des modèles de prédiction utilisés. A mesure que la période de

prédiction s'allonge, la performance du modèle diminue et les prédictions deviennent alors de moins en moins exactes. Cette imprécision invalide les longues simulations et met en doute l'optimalité du plan d'action qui en résulte.

Finalement, les longs horizons de prédiction nécessitent l'emploi de modèles de plan d'action qui comportent un plus grand nombre de paramètres. Le processus d'optimisation s'en trouve alors considérablement alourdi et son efficacité décline très rapidement.

De ce qui précède, il nous semble logique de prétendre que l'horizon de prédiction "optimal" sera, dans notre système, égal ou inférieur au temps de parcours dans l'intercepteur. Calculons donc ce temps de parcours à partir du débit maximal de chaque tronçon, tel que déterminé selon l'équation de Manning. On a :

numéro du tronçon	débit maximal (m ³ /s)	longueur (m)	vitesse (m/s)	temps de parcours (min)
1	0.83	500	1.26	6.6
2	1.10	500	0.94	8.9
3	1.67	500	1.43	5.8
4	1.96	500	1.07	7.8

On obtient un temps de parcours de 29.1 minutes, ce qui représente un horizon de prédiction maximal de 6 pas de temps.

4.6.2 L'horizon de prédiction et la méthode d'optimisation

Dans les simulations précédentes, nous avons toujours utilisé des horizons de prédiction dont la longueur variait entre 1 et 10 pas de temps. L'examen des résultats obtenus, en particulier les **graphiques 4.3 à 4.7 et 4.9 à 4.13**, nous confirme que les charges déversées diminuent à mesure que s'allonge la durée de la période de prédiction. Cependant, passé une certaine longueur d'horizon, cette diminution n'est plus observée. En fait, aucune amélioration importante n'est notée suite à l'emploi d'un horizon de prédiction supérieur à la limite de 6 pas de temps précédemment établie. De plus, dans la plupart des cas, les charges ne diminuent pratiquement plus dès que l'horizon dépasse 4 ou 5 pas de temps.

Nous observons également sur ces graphiques que pour les horizons plus longs, il est fréquent que les charges déversées commencent à augmenter. Nous attribuons ceci à un échec de l'optimisation. En effet, les méthodes d'optimisation ont une efficacité qui diminue énormément lorsque le nombre de paramètres à optimiser augmente. Comme le modèle de plan d'action exige l'ajustement d'un nombre de paramètres qui est proportionnel à la longueur de l'horizon de prédiction, il n'est donc pas surprenant d'observer ces mauvaises performances.

Nous en concluons donc que les limites intrinsèque des méthodes d'optimisation posent une contrainte à la longueur de l'horizon de prédiction. Dans le cas présent, cette limite semble coïncider avec le temps de parcours du système.

Ce fait nous indique encore une fois que l'horizon de prédiction "optimal" devra être inférieur à 6 pas de temps.

Nous avons donc décidé de choisir un horizon de prédiction de 4 pas de temps. Les résultats précédents nous indiquent en effet qu'il y a peu d'avantages à employer un horizon plus long. De plus, un plan d'action utilisant un horizon de 4 pas de temps peut être optimisé en seulement 30 secondes (temps CPU), ce qui est raisonnable pour un contrôle dont le pas de temps de décision est de 5 minutes.

4.7 L'évaluation du plan d'action

Pour déterminer le plan d'action optimal, il faut en comparer plusieurs sur la base d'un critère qui quantifie leur performance respective. Ce critère peut être défini par une fonction qui est construite de façon à exprimer, quantitativement, le degré de réalisation des objectifs visés. Ainsi, au cours du processus d'optimisation, l'application de plusieurs plans d'action est simulée et la comparaison des valeurs des fonctions objectif résultantes permet alors de déterminer celui qui est le meilleur.

Dans notre cas, l'objectif de l'optimisation consiste à minimiser les charges déversées. En conséquence, la fonction objectif sera tout simplement la somme des

charges déversées pendant une simulation. L'optimisateur se chargera alors de trouver le plan d'action qui donne la plus faible valeur de la fonction objectif, donc le plan d'action qui permet de minimiser les charges polluantes déversées.

CHAPITRE V

5. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous allons d'abord développer les éléments manquants nécessaires à la réalisation d'un contrôle prédictif intégré qui tient compte de la qualité des eaux à déverser, mais qui ne nécessite pas la mesure de cette qualité. Il s'agit d'une part, du choix du paramètre qualitatif sur lequel seront basées les décisions de contrôle ; et d'autre part, du choix de la relation qui, à partir d'une mesure du débit, permettra l'évaluation en temps réel de ce paramètre.

Puis, ayant en main tous les outils indispensables à la simulation d'un contrôle fondé sur une estimation en continu de la qualité des débordements, nous procéderons alors à la vérification des hypothèses énoncées au chapitre 3.

5.1 Choix du paramètre de contrôle

Une de nos hypothèses stipulait qu'il pourrait être avantageux de diriger le contrôle en fonction d'un seul paramètre qualitatif plutôt qu'en fonction d'un indice qui en combine plusieurs. Si le paramètre retenu démontre une certaine corrélation avec les autres, il devrait en résulter une diminution de l'ensemble des charges

polluantes déversées, et par conséquent, une réduction globale des impacts sur le cours d'eau récepteur. Il nous faut donc identifier ce paramètre décisionnel, et pour y parvenir, nous avons eu recours à différentes méthodes.

5.1.1 Corrélacion entre paramètres

Le premier pas dans notre recherche du paramètre de contrôle est le calcul des coefficients de corrélation entre tous les paramètres de qualité. Nous y procédons en utilisant l'ensemble des données que nous possédons de la campagne de mesure réalisée par le MENVIQ sur le territoire de la ville de Québec. Ces données concernent les cinq bassins décrits précédemment au chapitre 4.1, et qui ont été échantillonnés pour cinq événements pluvieux survenus au cours de l'été 1982. Les résultats de ce calcul sont présentés au **tableau 5.1**. Ces coefficients de corrélation ont été obtenus à l'aide de :

$$r = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{[(N \sum x^2 - (\sum x)^2) (N \sum y^2 - (\sum y)^2)]^{1/2}}$$

Ce coefficient a une valeur située entre les limites -1 et 1; et il devrait être nul quand les variables sont indépendantes, c'est-à-dire lorsqu'il y a absence de relation linéaire entre les deux variables. L'inverse n'est pas nécessairement vrai, bien que le coefficient de corrélation soit quand même généralement interprété comme une évaluation du degré de dépendance entre deux variables. Un coefficient positif indique une relation proportionnelle, tandis qu'un coefficient négatif indique une relation inversement proportionnelle. Lorsque l'échantillon est de taille importante, comme c'est le cas ici, le carré du coefficient de corrélation représente la proportion de la variation d'une variable qui peut être expliquée par une relation linéaire avec l'autre variable (Snedecor et Cochran, 1967).

L'analyse du **tableau 5.1** nous montre des coefficients qui sont tous positifs. Si on fait abstraction de la DCO, qui présente des coefficients de corrélation nettement moins élevés, on observe que les autres paramètres ont des coefficients d'environ 0.70, ce qui signifie qu'environ 50 % des variations sont linéairement reliées. De plus, on constate que le paramètre qui semble le plus corrélé avec l'ensemble des autres est la mesure des MES. Ce résultat nous indique qu'un contrôle prédictif basé sur la minimisation des charges déversées de ce seul paramètre pourrait effectivement contribuer à diminuer également les charges déversées des autres paramètres. Cet aspect sera vérifié ultérieurement au moyen de simulations.

Ce tableau nous montre également que les autres paramètres de qualité sont presque autant corrélés entre eux que les MES. Ceci nous révèle que les

concentrations des divers contaminants sont jusqu'à un certain point reliées, et que, comme nous en avons fait l'hypothèse, le contrôle des rejets de l'un pourrait également agir sur les rejets des autres.

Tableau 5.1 **Corrélations entre les paramètres de qualité**
(à partir des données de la campagne du MENVIQ)

	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
MES	1.0000	0.5540	0.6508	0.8173	0.7144
DCO	0.5540	1.0000	0.3966	0.3837	0.2855
Cu	0.6508	0.3966	1.0000	0.7097	0.5133
Pb	0.8173	0.3837	0.7097	1.0000	0.6895
Zn	0.7144	0.2855	0.5133	0.6895	1.0000
MOYENNE	0.7473	0.5240	0.6541	0.7200	0.6405

5.1.2 Simulations

Les simulations étant un moyen de vérifier l'efficacité d'un contrôle monoparamétrique, elles peuvent donc nous servir à identifier le paramètre de décision recherché. A cette fin, nous avons effectué des simulations en utilisant chacun des cinq paramètres de qualité à tour de rôle comme paramètre de contrôle. Pour chacune de ces simulations, les charges déversées du paramètre de contrôle, de même que celles des paramètres non-contrôlés ont été calculées. Les résultats en sont présentés au **tableau 5.2**.

Ces différentes valeurs étant difficiles à comparer, nous les avons normalisées. On retrouve donc au **tableau 5.3** les pourcentages de diminution des charges déversées de chaque paramètre par rapport à celles obtenues avec un contrôle réactif local. Ces résultats nous indiquent que tous les paramètres, excepté la DCO, peuvent être utilisés comme paramètre décisionnel. En effet, on remarque que le contrôle basé sur la DCO entraîne des augmentations des charges déversées des autres paramètres qui vont de 8 % à 17 %. Ceci peut être expliqué par la faible corrélation de la DCO observée à la section précédente.

Si on examine maintenant la diagonale du **tableau 5.3**, on constate que les MES sont le paramètre de contrôle qui obtient la plus importante réduction de sa charge déversée, soit 19.3 %. Toutefois, les écarts observés entre les différentes valeurs ne sont pas suffisamment significatifs pour nous permettre d'identifier le meilleur paramètre de contrôle.

Tableau 5.2 Charges polluantes déversées (kg) lors d'un contrôle réactif local et d'un contrôle prédictif ayant pour objectif la minimisation des charges déversées de chacun des paramètres de qualité

PARAMETRE DE CONTROLE	PARAMETRES NON-CONTROLES				
	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
MES	236.9193	259.7954	0.1495	0.3002	0.8616
DCO	318.1778	231.9228	0.1790	0.3898	1.0110
Cu	253.2531	246.4900	0.1404	0.3118	0.8772
Pb	260.5018	270.4381	0.1498	0.2982	0.8133
Zn	251.4726	264.5510	0.1483	0.3029	0.7825
CR LOCAL	293.6726	266.2984	0.1529	0.3559	0.9039

Tableau 5.3 Pourcentages de diminution des charges polluantes déversées lors d'un contrôle prédictif ayant pour objectif la minimisation des charges déversées de chacun des paramètres de qualité, par rapport à celles obtenues avec un contrôle réactif local

PARAMETRE DE CONTROLE	PARAMETRES NON CONTROLES				
	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
MES	19.3	2.4	2.2	15.7	4.7
DCO	-8.3	12.9	-17.1	-9.5	-11.8
Cu	13.8	7.4	8.2	12.4	3.0
Pb	11.3	-1.6	2.0	16.2	10.0
Zn	14.4	0.7	3.0	14.9	13.4

Nous tenons cependant à faire remarquer que les résultats de ces simulations ne tiennent pas compte de l'importance relative des impacts des différents contaminants sur le milieu récepteur. Cet impact est difficile à quantifier car l'effet toxique de ces polluants dépend des nombreux processus de dilution, de sédimentation, d'adsorption, de complexation, d'oxydo-réduction,... qui ont cours dans le milieu naturel. Il est toutefois possible de l'estimer par un indice, que nous appelons indice d'impact relatif, et qui représente le rapport des charges déversées (kg) du polluant considéré sur le critère de qualité (mg/L) correspondant. Ce critère constitue le seuil de concentration qu'il est recommandé de ne pas dépasser dans le cours d'eau récepteur (Villeneuve et Lavallée, 1986).

Cet indice a été calculé pour les diminutions des charges déversées, obtenues par rapport au contrôle réactif local, pour chacun des paramètres de qualité utilisés pour diriger le contrôle. Les résultats de ces calculs sont présentés au **tableau 5.4**, et on y constate que le contrôle des MES est celui qui procure la plus importante diminution de l'indice d'impact relatif.

Tableau 5.4 Diminution de l'indice d'impact relatif du contrôle prédictif par rapport au contrôle réactif local

Paramètre de contrôle	Diminution de la charge déversée (kg)	Critère de qualité* (mg/L)	Diminution de l'indice d'impact relatif
MES	56.7533	11.0	5.2
DCO	34.3756	11.0	3.1
Cu	0.0125	0.005	2.5
Pb	0.0577	0.025	2.3
Zn	0.1214	0.030	4.0

* Tiré de Villeneuve et Lavallée (1986)

5.1.3 Autres considérations

En plus des calculs de corrélation et des simulations, le choix du paramètre clé s'est également basé sur des considérations d'ordre plus qualitatif. Ainsi, la représentativité du paramètre, la possibilité de le mesurer en temps réel et sa corrélation avec le débit sont autant de facteurs qui doivent intervenir dans notre décision.

Au chapitre de la représentativité, ce sont indéniablement les MES qui décrivent le mieux la qualité des eaux déversées. D'une part, ce sont les polluants

qui y sont les plus abondants; et d'autre part, ces solides englobent plusieurs autres types de contaminants qui sont eux aussi très abondants.

En effet, bien que les MES contenues dans les eaux de débordement soient pour la plupart des solides inorganiques, elles comprennent également des contaminants de nature métallique ou organique. Ainsi, les métaux peuvent exister sous forme de particules solides, ou encore être véhiculés sous forme adsorbée à la surface des MES. Quant aux matières organiques, elles sont habituellement présentes sous forme particulière puisqu'elles proviennent en grande partie de sédiments qui se sont déposés en temps sec dans les conduites.

Les MES constituent donc une caractéristique qui représente très bien la qualité des eaux de débordement puisqu'elles intègrent les contaminants qui y sont les plus abondants, soit les solides, les métaux et la matière organique.

En outre, les MES sont un des paramètres qui caractérise le mieux l'impact global des débordements de réseaux unitaires. En effet, comme il a été mentionné au chapitre 2, la charge de polluants qui sédimente à la sortie des trop-pleins est une des principales causes de la détérioration à long terme de la qualité du milieu récepteur.

Il n'est donc pas étonnant que certains auteurs considèrent les MES comme étant le paramètre de base pour la détermination de la qualité des eaux de débordement (Lessard et al., 1982). Ceci explique en partie pourquoi la plupart des

essais de corrélations entre paramètres qualitatifs qui sont rapportés dans la littérature utilisent les MES comme variable indépendante explicative.

Très peu de paramètres de qualité sont actuellement mesurables en temps réel. Il est toutefois possible de mesurer la turbidité et d'en déduire la concentration de MES à partir de relations prédéterminées. La validité de ces relations est cependant très controversée (Geiger, 1984; Lessard, 1981; Drozier, 1977). Par conséquent, étant donné l'impossibilité de bénéficier d'une mesure en continu des paramètres de qualité, et étant donné notre intention de proposer un contrôle où cette mesure n'est pas requise, nous ne retiendrons donc pas ce critère de facilité de mesure dans le choix du paramètre clé.

Comme nous l'avons souligné au chapitre 3, nous nous proposons d'utiliser une évaluation du paramètre de contrôle, laquelle évaluation serait effectuée en temps réel à partir de la mesure correspondante du débit. La corrélation avec le débit est donc un critère de choix essentiel. Ces corrélations ont été calculées et elles sont présentées au **tableau 5.5**.

On y voit que le Pb est le paramètre qui démontre la plus forte corrélation, suivi des MES et du Cu; le Zn et la DCO étant très peu corrélés avec le débit. Bien sûr, les corrélations observées sont assez faibles, mais comme nous l'avons déjà mentionné, nous ne recherchons pas une relation absolue entre le débit et le paramètre de qualité. Il ne s'agit donc pas ici d'inférer une mesure exacte du paramètre, mais plutôt d'en obtenir une évaluation qui soit suffisamment fiable pour guider le contrôle.

Tableau 5.5**Corrélations entre les paramètres de qualité et le débit**

MES	0.4172
DCO	0.1026
Cu	0.3072
Pb	0.4373
Zn	0.1702

5.1.4 Paramètre choisi

Au vu des considérations précédentes, il nous apparaît maintenant logique de choisir les MES comme paramètre clé sur lequel seront basées les décisions de contrôle. Ce paramètre est corrélé avec tous les autres paramètres de qualité considérés et il produit un contrôle relativement performant, puisque c'est le contrôle basé sur les MES qui procure la meilleure minimisation des charges déversées du paramètre de contrôle (diagonale du **tableau 5.3**). En outre, il s'agit incontestablement d'un paramètre qui représente très bien la qualité globale des eaux de débordement, et de plus, il affiche une bonne corrélation avec le débit, ce qui devrait en faciliter la modélisation.

Mentionnons également que les procédés habituellement proposés pour traiter les eaux de débordement sont des procédés physiques qui visent

principalement à réduire la charge de solides rejetés. Pour aller dans le même sens, il est donc logique de faire un contrôle dont l'objectif soit comparable, c'est-à-dire qui cherche à minimiser les charges de MES déversées.

5.2 Choix d'un modèle de qualité

5.2.1 Les modèles essayés

Il nous faut maintenant trouver un modèle simple reliant la concentration de MES au débit dans les collecteurs. Isabel et al. (1987) ont développé et vérifié sept modèles empiriques simples qui sont présentés au **tableau 5.6**. Bien qu'ils se soient révélés peu précis, ces modèles parviennent néanmoins à suivre les variations des concentrations de MES avec une précision variant, selon les pluies et les bassins considérés, de $\pm 180\%$ à $\pm 22\%$. Ces estimations sont loin d'être totalement inutiles puisqu'au cours d'un événement pluvieux, les concentrations de MES varient souvent de plus d'un ordre de grandeur ($\pm 1000\%$).

Tableau 5.6**Modèles empiriques reliant la concentration de MES au débit**

1	$C(t) = \alpha Q(t)$
2	$C(t) = \alpha Q(t) + \beta Q(t-\Delta t)$
3	$C(t) = \alpha \frac{Q(t)^2}{Q(t-\Delta t)}$
4	$C(t) = \alpha Q(t) + \beta \left(\frac{Q(t)}{Q(t-\Delta t)} - 1 \right)$
5	$C(t) = \alpha Q(t)^\beta$
6	$C(t) = \alpha Q(t) + \beta Q(t-\Delta t) + \gamma Q(t-2\Delta t)$
7	$C(t) = \alpha \left(\frac{Q(t)}{Q(t-\Delta t)} \right)^\beta$

Tiré de Isabel et al. (1987)

Les modèles proposés par ces auteurs peuvent donc nous être utiles pour la mise en oeuvre d'un contrôle en temps réel basé sur la qualité des eaux de débordement, plutôt que sur leur seul volume. L'état actuel des techniques de mesure ne permettant pas une surveillance continue de la qualité des eaux unitaires, une estimation grossière de la concentration de MES est en effet préférable à une ignorance complète de ce paramètre.

5.2.2 Calibration des modèles

Tous les modèles de qualité proposés comprennent au moins un coefficient empirique dont il faut déterminer la valeur. Pour effectuer la calibration des modèles, nous avons utilisé la méthode des moindres carrés. Elle consiste à trouver quelle valeur du ou des coefficients va permettre de minimiser la somme des carrés des écarts entre la valeur prédite de la concentration et la valeur mesurée ; et ce, pour un ensemble de données mesurées concomitantes de débit et de concentration. Ceci peut être exprimé de la façon suivante :

$$\min \sum_{i=1}^n (C(t_i) - \hat{C}(t_i))^2$$

où:

$C(t)$: concentration prédite de MES au temps t

$C(t)$: concentration mesurée de MES au temps t

n : nombre de données mesurées concomitantes

La calibration des modèles a été effectuée au moyen de l'algorithme d'optimisation non-linéaire de Powell (1965), qui a été appliqué sur les 25 séries de données que nous possédons. Comme il a déjà été mentionné, ces mesures ont été récoltées à l'exutoire de cinq bassins de la ville de Québec pendant cinq événements de pluie survenus au cours de l'été 1982. Les résultats de ces calibrations sont présentés aux **tableaux 5.7 à 5.13**.

Avant de poursuivre plus en avant, il nous faut mentionner que les modèles ont été calibrés à partir des données de tous les événements pluvieux, y compris celles de l'événement qui fera ultérieurement l'objet d'une simulation de contrôle. Bien entendu, les données de cet événement ne sont évidemment pas supposées être connues, et comme elles ne constituent pas une série antérieure, elles ne devraient pas servir à la calibration. Mais étant donné le peu de mesures que nous possédons, nous avons jugé qu'il était préférable d'utiliser toutes les données disponibles. Les simulations seront donc effectuées avec la moyenne des valeurs de coefficients qui auront été obtenues pour les différents événements de pluie.

On peut remarquer dans les **tableaux 5.7 à 5.13** que les valeurs des coefficients varient énormément d'un bassin à l'autre et d'une pluie à l'autre. Les modèles simples que nous utilisons ne peuvent évidemment pas expliquer la totalité du comportement des MES puisqu'ils ne font intervenir qu'une seule variable, en l'occurrence le débit, pour décrire la qualité des eaux collectées. Il y a donc, par conséquent, une foule de processus importants et de variables explicatives qui sont négligés.

Nous avons donc choisi d'utiliser des coefficients de valeur différente pour chacun des bassins. Ces derniers sont obtenus en calculant, pour chaque bassin, la moyenne des résultats de calibration des cinq événements pluvieux considérés. Ces moyennes sont également présentées aux **tableaux 5.7 à 5.13**.

Remarquons qu'idéalement, il aurait été préférable, compte tenu de la variabilité des résultats de calibration, d'utiliser les coefficients de la pluie la plus représentative. Ce choix, basé sur l'analyse des pollutogrammes et des hydrogrammes mesurés, aurait cependant introduit une part de subjectivité dans la procédure de sélection du modèle. Pour l'éviter, nous avons préféré utiliser les coefficients moyens, même s'il en résulte des modèles calibrés qui sont peut-être moins efficaces.

Tableau 5.7 Résultats de la calibration du modèle 1

PLUIE	2	7	BASSIN 11	12	14
1	0.3101	0.3687	0.4316	0.1385	0.8392
2	0.1870	0.2976	0.3941	0.1546	0.2891
3	0.2792	0.2877	0.5659	0.1614	0.5770
4	0.0731	0.1118	0.2185	0.0471	0.1296
5	0.2959	0.3040	0.3503	0.2475	1.1170
α moyen	0.2291	0.2740	0.3921	0.1498	0.5904

Tableau 5.8 Résultats de la calibration du modèle 2

PLUIE	2	7	BASSIN 11	12	14
1	1.5495	0.6844	0.1194	0.0881	-1.0251
2	0.3062	0.5339	0.3676	0.3757	0.7890
3	0.1405	0.1498	0.3696	0.1439	0.5704
4	0.0077	0.3035	-0.4838	0.0383	0.2111
5	0.2376	-0.2999	0.6540	-0.0820	-2.0019
α moyen	0.4483	0.2743	0.2054	0.1128	-0.2913
1	-1.2585	-0.3164	0.3097	0.0604	1.8046
2	-0.1231	-0.2489	0.0271	-0.2296	-0.5308
3	0.1498	0.1507	0.2372	0.0204	-0.0076
4	0.0527	-0.1980	0.6619	0.0088	-0.0857
5	0.0585	0.6018	-0.2978	0.3261	3.1119
β moyen	-0.2241	-0.0022	0.1876	0.0372	0.8585

Tableau 5.9 Résultats de la calibration du modèle 3

PLUIE	BASSIN		BASSIN		
	2	7	11	12	14
1	0.3027	0.3679	0.4319	0.0239	0.8498
2	0.1307	0.2344	0.3423	0.0941	0.2747
3	0.0228	0.0854	0.0646	0.0740	0.2888
4	0.0429	0.1027	0.1845	0.0416	0.1150
5	0.2806	0.3078	0.3568	0.2495	1.1122
α moyen	0.1559	0.2196	0.2760	0.0966	0.5281

Tableau 5.10 Résultats de la calibration du modèle 4

PLUIE	BASSIN		BASSIN		
	2	7	11	12	14
1	0.3047	0.3667	0.4305	0.1191	0.8341
2	0.1876	0.3043	0.3944	0.1316	0.2923
3	0.3912	0.2788	0.7085	0.1611	0.5908
4	0.0616	0.1164	0.2092	0.0468	0.1284
5	0.2957	0.3068	0.3528	0.2493	1.1210
α moyen	0.2482	0.2746	0.4191	0.1416	0.5934
1	-0.9985	-0.0617	0.0360	29.2437	0.5538
2	-5.5622	-33.2613	-1.7950	64.6499	-18.1350
3	-108.7779	36.3478	-104.1080	-4.0239	-53.0457
4	1.7700	-52.1519	6.0282	-0.5059	-1.5867
5	0.6268	0.5419	0.0509	1.1016	0.8695
β moyen	-22.5883	-9.7170	-19.9576	18.0931	-14.2688

Tableau 5.11 Résultats de la calibration du modèle 5

	PLUIE	2	7	BASSIN 11	12	14
1	51074.0000	61.0625	87.3750	1103.1875	20.8750	
2	77.3750	55.4375	8.9375	1039.8750	218.0625	
3	36.6250	5.6250	3.8125	9.1875	29.0625	
4	4.4375	7.0625	36.1250	77.2500	101.9375	
5	24.8125	33.7500	18995.8750	85.5625	11.6875	
α moyen	10243.4500	32.5875	3826.4250	463.0125	76.3250	
1	-1.0883	0.0728	-0.0004	-0.3693	0.2894	
2	0.0093	0.1487	0.4673	-0.3488	-0.0818	
3	0.2727	0.5751	0.7305	0.5004	0.4240	
4	0.3896	0.3916	0.1434	-0.0878	-0.1893	
5	0.2765	0.2347	-0.9244	0.0568	0.5019	
β moyen	-0.0280	0.2846	0.0833	-0.0497	0.1888	

Tableau 5.12

Résultats de la calibration du modèle 6

PLUIE	2	7	BASSIN 11	12	14
1	1.1111	0.4177	1.4093	0.0853	1.4947
2	0.1771	0.5295	0.3357	0.1907	0.4585
3	0.1916	0.1507	0.4080	0.1398	0.7967
4	0.0220	0.1494	-0.0825	0.0479	0.2492
5	0.3041	-0.1486	10.0729	0.2628	-0.5075
α moyen	0.3612	0.2197	2.4287	0.1453	0.4983
1	-0.3961	0.2854	-2.6497	0.0114	-4.3637
2	0.2030	-0.2077	0.0716	0.0447	0.3412
3	0.0410	0.0415	-0.0014	0.0327	-0.6073
4	0.0012	0.0780	-0.2493	-0.0173	-0.2262
5	-0.1002	0.3038	-19.4569	-0.4916	0.0474
β moyen	-0.0502	0.1002	-4.4571	-0.0840	-0.9617
1	-0.4293	-0.3363	1.6682	0.0605	3.6167
2	-0.2052	-0.0401	-0.0140	-0.0978	-0.5637
3	0.0238	0.1189	0.2498	-0.0124	0.4170
4	0.0314	-0.1270	0.5004	0.0165	0.1045
5	0.0933	0.1497	9.7422	0.4741	1.5765
γ moyen	-0.0972	-0.0470	2.4293	0.0882	1.0302

Tableau 5.13

Résultats de la calibration du modèle 7

PLUIE	BASSIN				
	2	7	11	12	14
1	90.6113	92.2402	86.9678	122.7793	69.0195
2	75.7246	106.5352	130.2783	99.7393	129.9190
3	79.4570	198.2813	70.1084	189.1084	167.3584
4	51.7012	86.5654	71.0459	44.5410	37.0703
5	133.0908	149.2324	126.1963	119.9678	114.8291
α moyen	86.1170	126.5709	96.9193	115.2272	103.6393
1	4.4465	1.8197	0.2068	0.1540	-1.1599
2	0.3283	1.9153	-0.0098	0.5687	0.8400
3	-1.8475	0.4890	-5.5872	0.8248	0.8512
4	-0.6297	1.1809	-2.7313	0.2450	0.7533
5	0.3601	0.8665	10.0838	0.1428	-0.9880
β moyen	0.5315	1.2543	0.3924	0.3871	0.0593

5.2.3 Résultats des simulations

Les sept modèles de qualité ont été employés à tour de rôle pour la simulation d'un contrôle prédictif intégré dont l'objectif est la minimisation des charges de MES déversées. Le réseau unitaire considéré est toujours le réseau fictif et l'horizon de prédiction a une longueur de 4 pas de temps. Les données de débit utilisées sont les valeurs réelles mesurées, tandis que les concentrations de MES sont celles prédites à l'aide des différents modèles.

Les résultats de ces simulations sont présentés au **tableau 5.14**. On y retrouve également les charges de MES déversées lors d'un contrôle réactif local et lors d'un contrôle prédictif intégré basé sur les concentrations mesurées de MES. Ces données correspondent respectivement aux bornes supérieure et inférieure des charges déversées, et elles vont nous servir de point de comparaison pour évaluer la performance de chacun des modèles d'estimation de la qualité. Pour faciliter l'analyse de ces résultats, on donne au **tableau 5.15** les pourcentages de diminution de ces charges déversées par rapport à celles qui sont obtenues avec un contrôle réactif local

Tableau 5.14 Charges de MES déversées (kg) lors d'un contrôle réactif local, d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES et d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES

PLUIE	1	2	3	4	5
CR LOCAL	67.4486	293.6726	5978.1538	1435.3435	256.5148
CP MESURE	67.4486	236.9193	5546.4492	1205.8928	256.5075
CP SIMULE					
MODELE 1	104.2956	257.4244	5856.8511	1325.7710	261.3043
2	104.2956	253.1109	5790.4131	1298.2891	261.2567
3	97.9856	280.4244	5894.0776	1323.1147	261.2509
4	456.6407	1062.0414	6400.4478	2204.5732	1051.7882
5	67.4486	293.6726	5978.1538	1435.3434	256.5148
6	101.0914	285.0581	5999.2813	1313.9958	261.4177
7	68.3990	280.3647	5947.0957	1401.5712	260.9503

Tableau 5.15 Pourcentages de diminution des charges de MES déversées lors d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES et d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES, par rapport à celles obtenues avec un contrôle réactif local

PLUIE		1	2	3	4	5
CP MESURE		0.0	19.3	7.2	16.0	0.0
CP SIMULE						
MODELE	1	-54.6	12.3	2.0	7.6	-1.9
	2	-54.6	13.8	3.1	9.5	-1.8
	3	-45.3	4.5	1.4	7.8	-1.8
	4	-577.0	-261.6	-7.1	-53.6	310.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	-49.9	2.9	-0.4	8.5	-1.9
	7	-1.4	4.5	0.5	2.4	-1.7

* Un signe négatif signifie une augmentation des charges déversées

Avant d'aller plus loin, nous tenons d'abord à faire remarquer les résultats assez particuliers des pluies 1 et 5. Ces pluies ont une faible intensité et leur distribution est telle qu'il se produit très peu de débordements. En conséquence, le contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES ne peut faire mieux qu'un contrôle réactif local. Les deux contrôles vont donc donner des charges déversées équivalentes. Dans ce cas, l'utilisation d'un modèle de qualité ne fait qu'empirer la situation, et il peut en résulter des charges déversées supérieures à celles du contrôle réactif local en raison des erreurs de prédiction du modèle.

Si on fait abstraction de ces deux pluies, on constate que le modèle 2 est celui qui a la meilleure performance. C'est en effet le modèle qui nous procure la plus grande réduction des charges de MES déversées, en comparaison de celles obtenues avec le contrôle réactif local. A notre avis, cette réussite peut être attribuée au fait qu'il s'agit d'un modèle simple, capable de représenter aisément la proportionnalité existant entre le débit et la concentration, et qui, grâce à son terme de taux de variation des débits, permet de tenir compte de l'avance du pic de concentration sur le pic de débit. Il a en effet été observé que, dans plusieurs situations, la pointe des concentrations précédait quelque peu la pointe des débits (Lessard et al., 1982; Brière, 1983). Cette particularité a reçu le nom de "first flush" et est attribuée à l'érosion des sédiments en conduite durant la période de crue.

A titre d'exemple, les pollutogrammes mesurés et simulés de chacun des modèles ont été tracés pour le bassin 2 et la pluie 2, de même que pour le bassin 12 et la pluie 3 (figures 5.1 à 5.14). De prime abord, les trois premiers modèles, et en

particulier le modèle 2, semblent être ceux qui représentent le mieux la réalité observée.

On remarque toutefois que le modèle 5 produit un contrôle dont le résultat est identique à celui du contrôle réactif local. En effet, les résultats de la calibration de ce modèle sont tels que les valeurs moyennes des coefficients β sont très proches de zéro. Cet exposant presque nul a pour effet que les concentrations simulées sont très peu variables puisqu'elles deviennent quasiment égales au coefficient α . En conséquence, lors de la simulation, la minimisation des charges déversées se résume pratiquement à une minimisation des débits. Il en résulte alors un contrôle similaire au contrôle réactif local.

Figure 5.1

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 1 pour le bassin 2 et la pluie 2

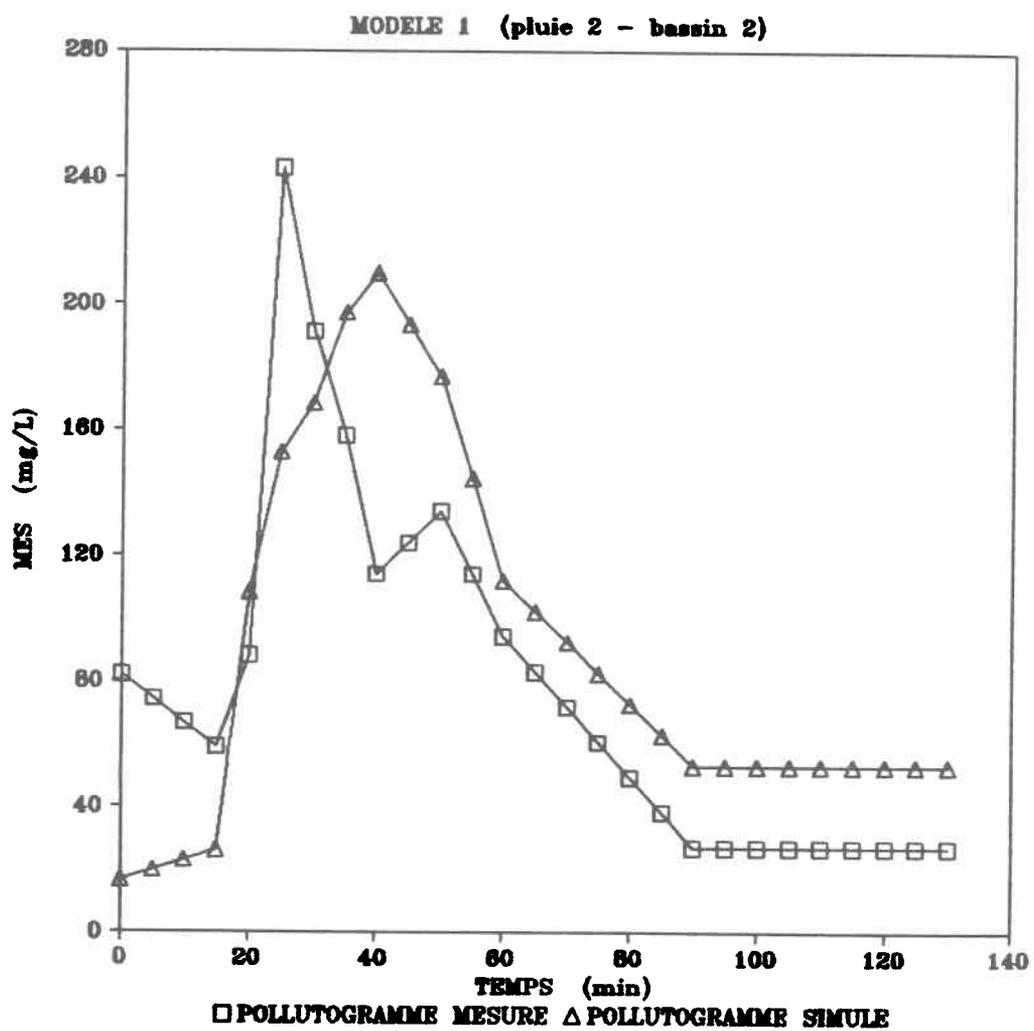


Figure 5.2

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 2 pour le bassin 2 et la pluie 2

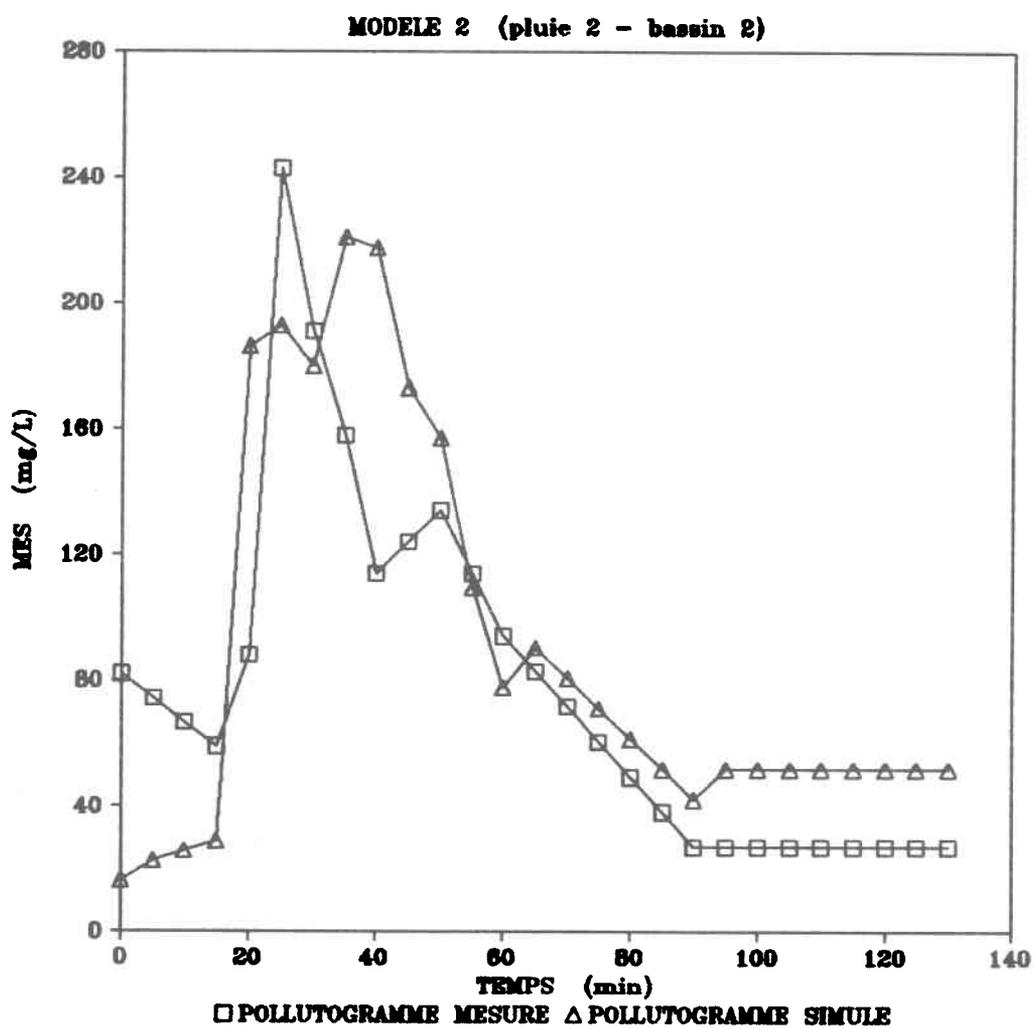


Figure 5.3

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 3 pour le bassin 2 et la pluie 2

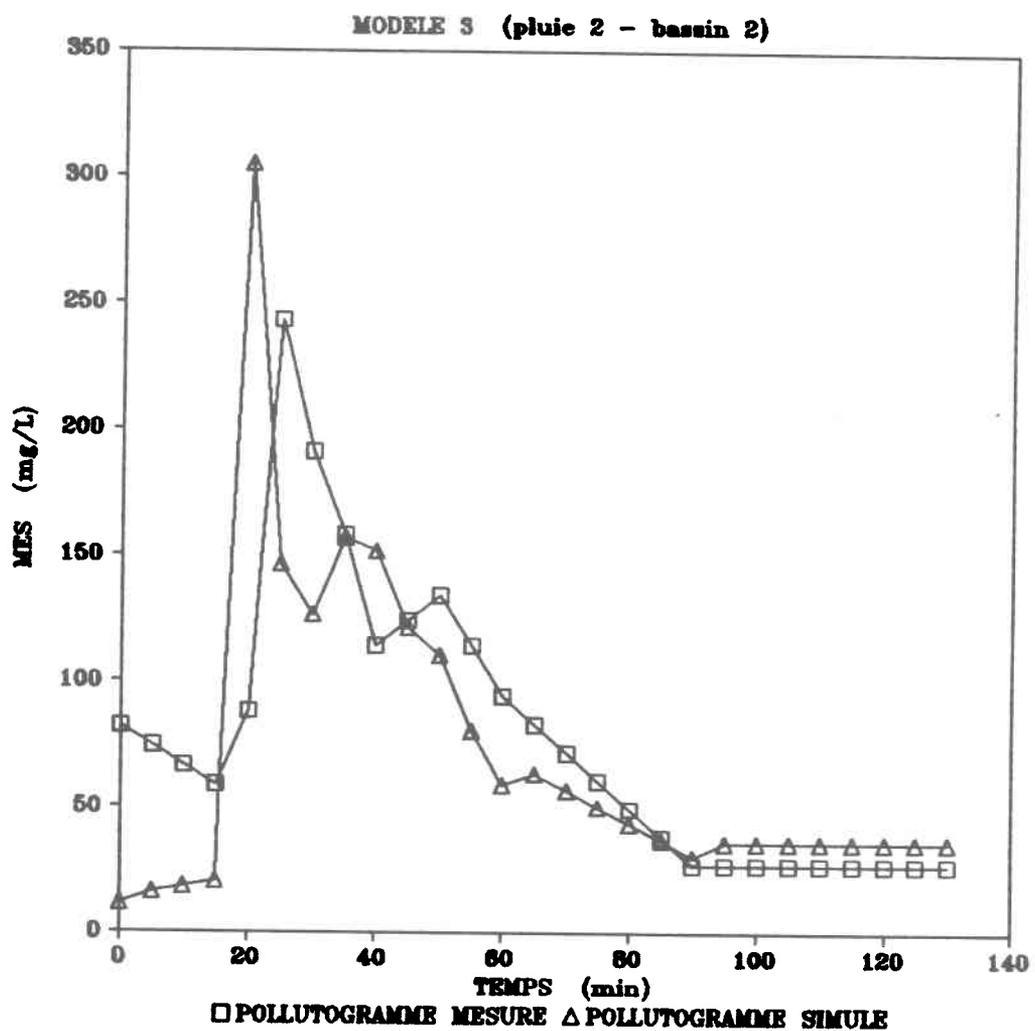


Figure 5.4

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 4 pour le bassin 2 et la pluie 2

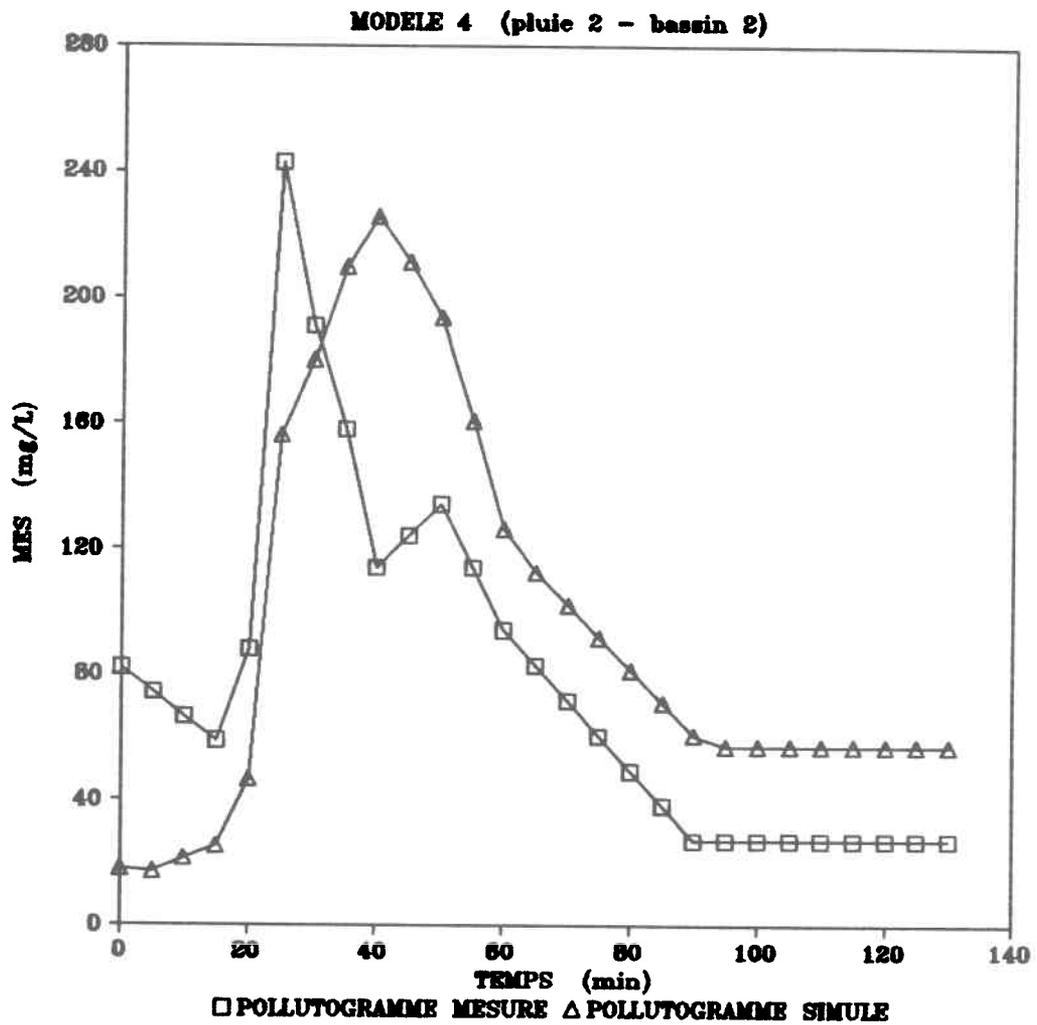


Figure 5.5

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 5 pour le bassin 2 et la pluie 2

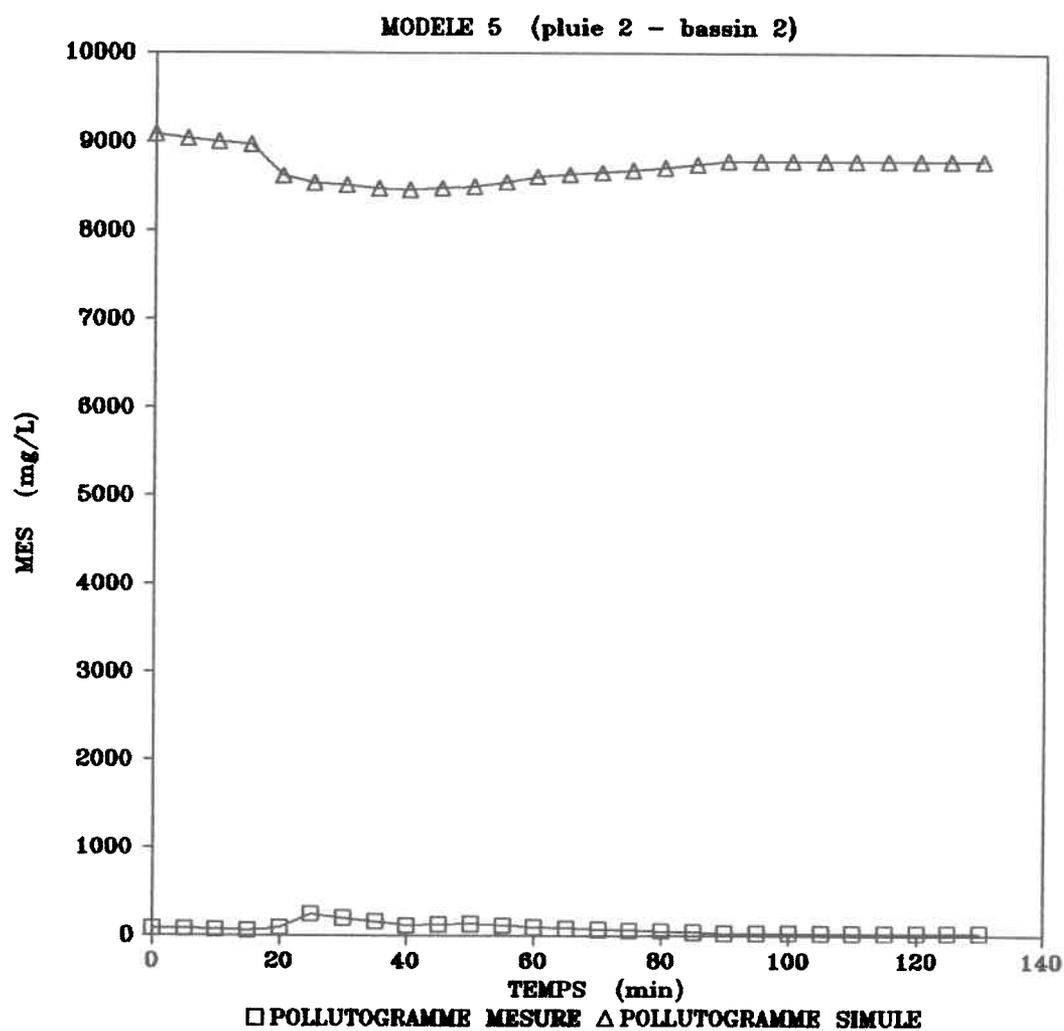


Figure 5.6

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 6 pour le bassin 2 et la pluie 2

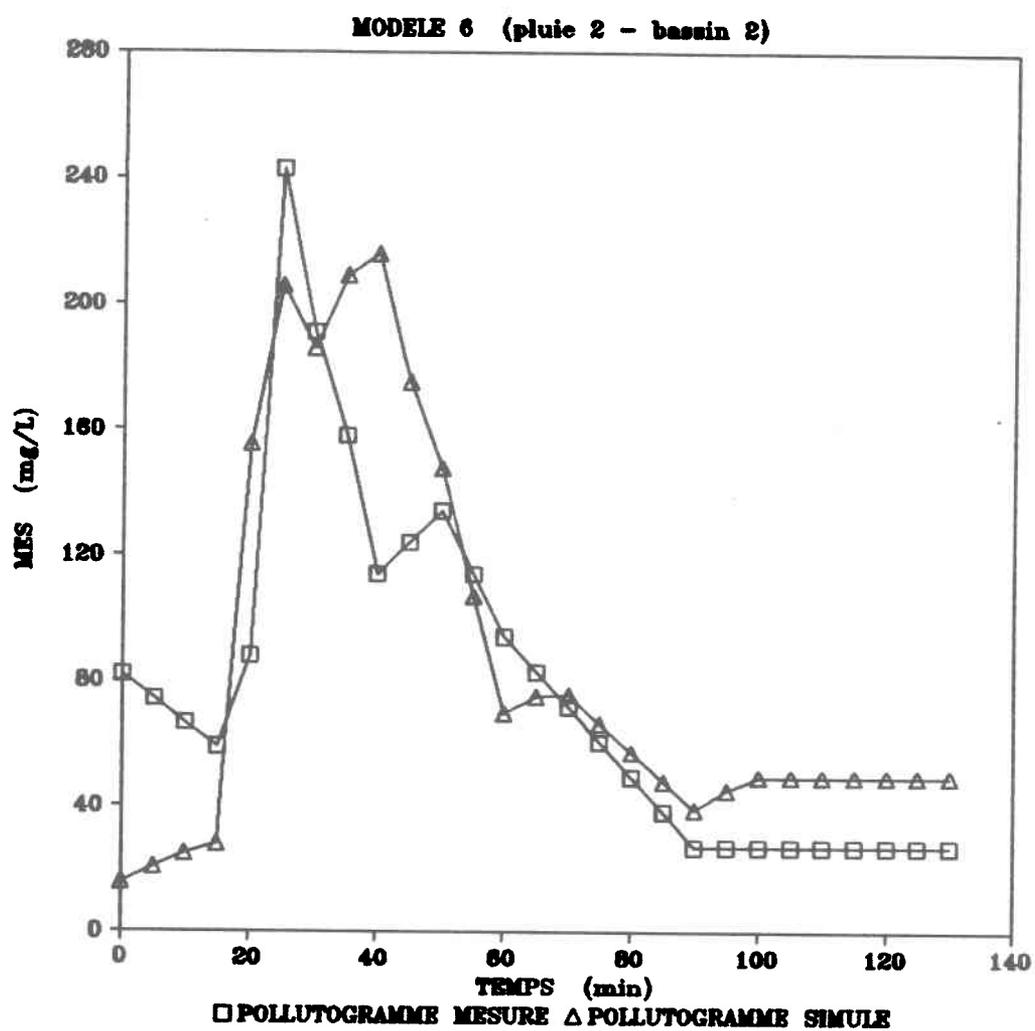


Figure 5.7

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 7 pour le bassin 2 et la pluie 2

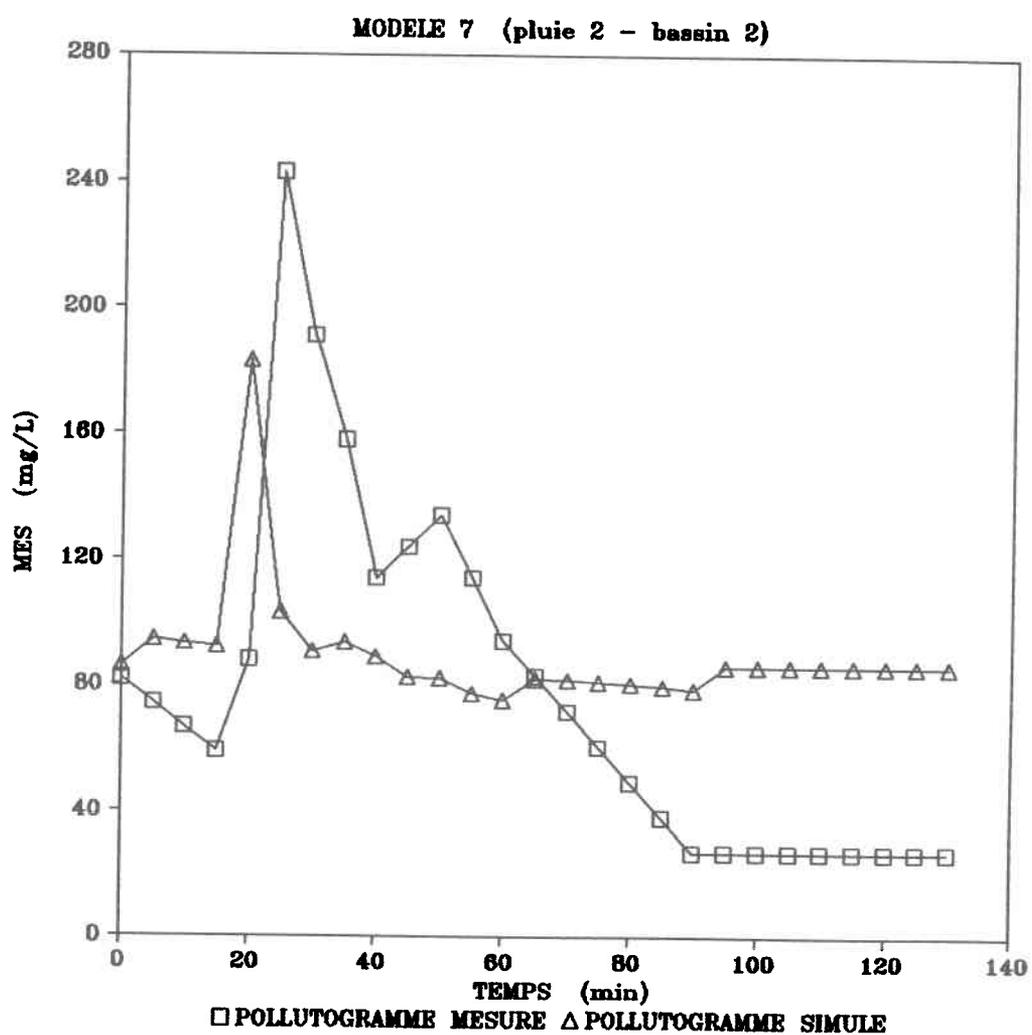


Figure 5.8

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 1 pour le bassin 12 et la pluie 3

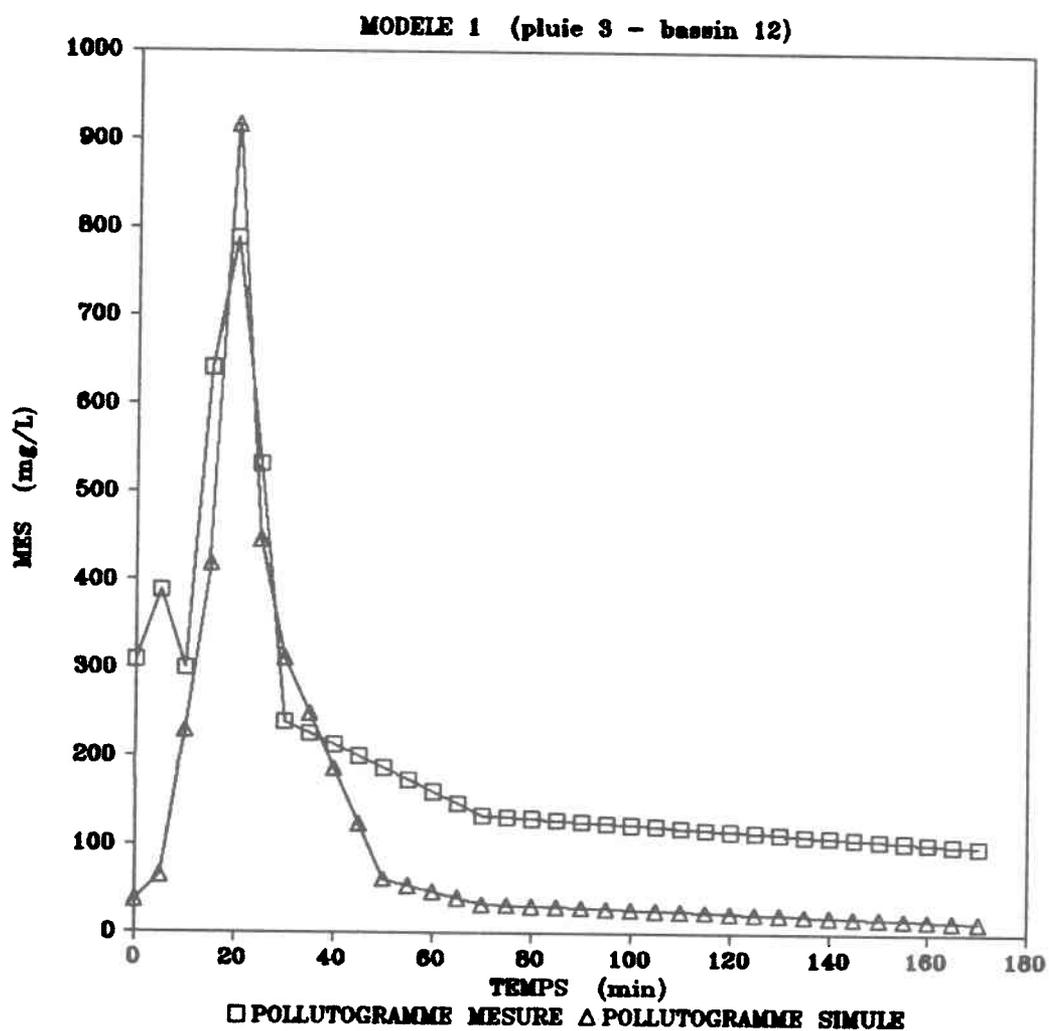


Figure 5.9

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 2 pour le bassin 12 et la pluie 3

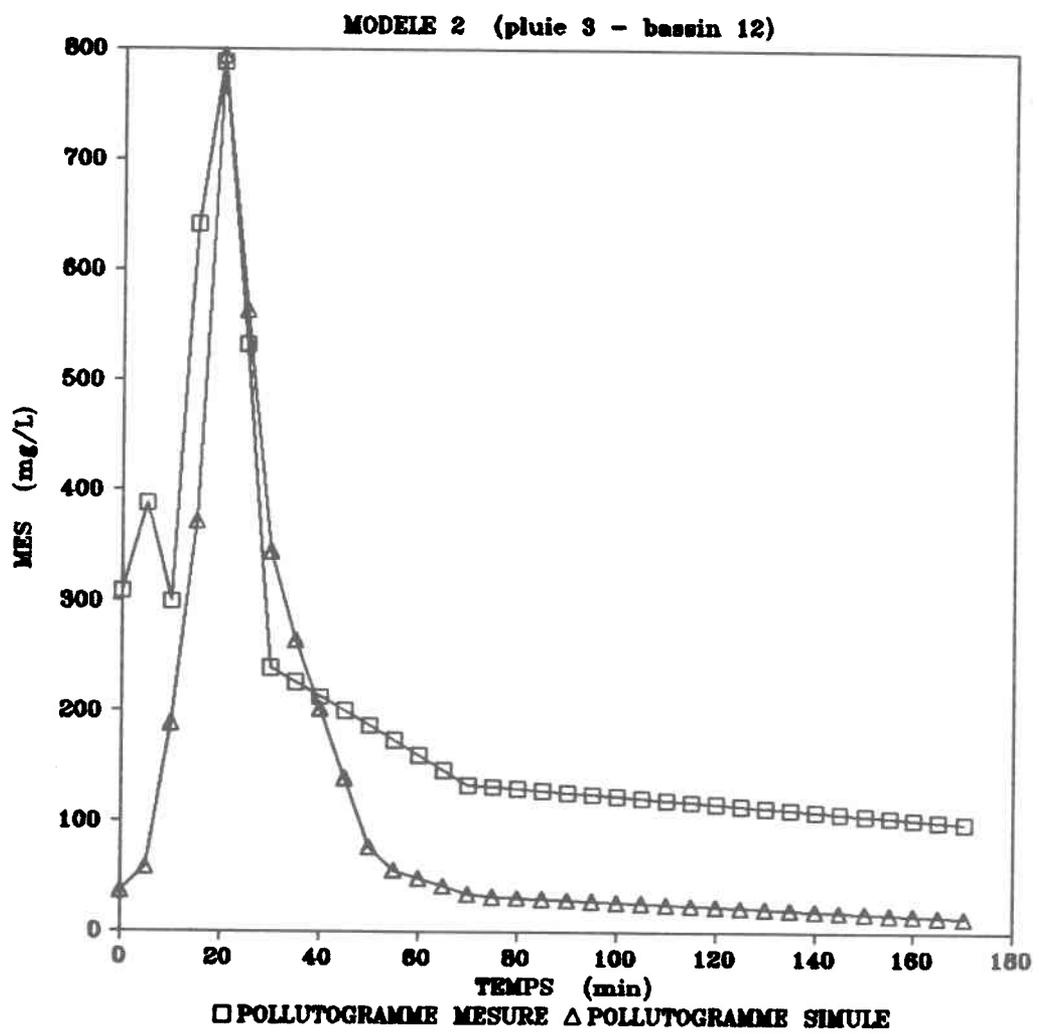


Tableau 5.20 Pourcentages de diminution des charges déversées de chacun des paramètres lors d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES, et lors d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES par rapport à celles obtenues avec un contrôle réactif local (réseau de Québec)

PLUIE	1	2	3	4	5
CP MESURE					
MES	1.9	17.2	2.8	3.7	8.8
DCO	3.2	-37.1	1.8	-1.0	2.3
Cu	-2.5	0.6	4.2	1.7	6.6
Pb	-2.1	3.9	2.5	4.0	14.0
Zn	-0.3	7.1	1.2	5.2	-5.4
CP SIMULE AVEC LE MODELE 2					
MES	-17.0	14.6	1.1	0.4	1.6
DCO	-11.1	-26.3	1.3	-0.2	2.2
Cu	-15.5	11.2	4.1	-0.1	5.0
Pb	-12.1	4.6	1.3	1.3	6.8
Zn	-13.7	9.9	-5.8	0.7	7.6

* Un signe négatif signifie une augmentation des charges déversées

On retrouve au **tableau 5.19** les charges déversées de chacun des paramètres pour les différents types de contrôles et au **tableau 5.20**, leur pourcentage de diminution par rapport aux charges déversées avec un contrôle réactif local. On remarque que dans l'ensemble, le contrôle basé sur le modèle 2 donne des résultats qui se situent entre ceux du contrôle réactif local et ceux du contrôle prédictif

utilisant les valeurs mesurées. Il y a encore toutefois l'exception de la pluie 1, où la faible quantité de débordements rend l'écart entre le contrôle réactif local et le contrôle prédictif mesuré trop étroit. En conséquence, le contrôle simulé produit alors des charges débordées supérieures à celles du contrôle réactif local.

Les volumes déversés suite à chacun de ces contrôles, de même que leur pourcentage d'augmentation par rapport au contrôle réactif local sont donnés au **tableau 5.21**. Bien que ces débordements soient plus importants que ceux obtenus précédemment, on remarque que les pourcentages d'augmentation des volumes déversés varient sensiblement de la même manière, d'une pluie à l'autre, que dans le cas du réseau fictif. On peut donc dire que dans l'ensemble, les résultats obtenus avec le réseau de Québec sont similaires à ceux du réseau fictif.

Tableau 5.21

Volumes déversés (m³) lors d'un contrôle réactif local, d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES et d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES (modèle 2) ET pourcentages d'augmentation de ces volumes par rapport à ceux obtenus avec un contrôle réactif local (réseau de Québec)

PLUIE	1	2	3	4	5
CR LOCAL	1131.71	4056.87	9673.94	16375.77	4252.64
CP MESURE	1131.72	4128.29	9809.92	16487.18	4261.58
CP SIMULE	1260.08	4137.38	10197.81	16375.79	4286.05
CP MESURE	0.0 %	1.8 %	1.4 %	0.7 %	0.2 %
CP SIMULE	11.3 %	2.0 %	5.4 %	0.0 %	0.8 %

CHAPITRE VI

6. CONCLUSION

Cette étude nous révèle qu'il est possible de réaliser un contrôle prédictif intégré qui tient compte de la qualité des eaux à déverser, sans avoir à recourir à des appareils de mesure de la qualité en temps réel. L'utilisation de modèles simples reliant la concentration de MES à la seule mesure du débit nous permet en effet d'avoir une estimation continue de la qualité des eaux unitaires.

Les résultats des simulations nous ont montré que le contrôle prédictif basé sur les concentrations estimées de MES ne permettait pas de réduire de façon significative les charges déversées du paramètre de contrôle. Cependant, comme le gain obtenu avec un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées était déjà marginal par rapport au contrôle réactif local, il n'est pas surprenant de constater que l'emploi de modèles d'évaluation de la qualité en annule une bonne part. Nous en concluons qu'à moins de bénéficier de modèles débit-qualité plus précis, le contrôle réactif local demeure le système le plus performant, pour le genre de réseau que nous avons modélisé.

Quant au fait de ne contrôler qu'en fonction d'un seul paramètre de qualité, il est apparu que cette approche était valable. Cependant, seul le paramètre contrôlé voit son impact diminuer significativement, tandis que les autres paramètres produisent des impacts qui sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec le contrôle réactif local. L'effet global est donc positif.

Nos deux hypothèses ont été vérifiées par l'expérience et se sont révélées fondées, bien que les résultats découlant de leur utilisation ne constituent pas une amélioration importante par rapport au contrôle réactif local. Le contrôle prédictif intégré ne doit cependant pas être rejeté pour autant car nos résultats ne peuvent être généralisés à outrance. En effet, les réseaux simulés ne sont pas adaptés à un contrôle en temps réel. Une capacité de stockage plus importante, obtenue avec des conduites plus grosses et des réservoirs en parallèle, pourrait sans doute procurer des réductions plus substantielles des charges polluantes déversées, ce qui rendrait le contrôle qualitatif plus intéressant. La simulation du contrôle d'un tel réseau pourrait constituer une voie de recherche à explorer.

La réalisation de cette étude nous a toutefois permis d'explorer plus à fond certains aspects du contrôle prédictif intégré qui avaient été peu abordés auparavant. Ainsi, nous avons pu préciser l'effet d'un laminage par onde cinématique sur la longueur optimale de l'horizon de prédiction. Nous avons constaté que l'horizon de prédiction optimal pouvait être inférieur au temps de concentration du réseau, et que l'emploi de longs horizons de prédiction était relativement peu avantageux en terme de minimisation des charges déversées. L'emploi des méthodes d'optimisation non-linéaires constitue également une nouveauté dans ce domaine. La durée des calculs d'optimisation était d'environ 0.5 minute, ce qui est raisonnable dans le contexte d'un contrôle en temps réel où les décisions sont prises à toutes les 5 minutes.

En résumé, le contrôle prédictif intégré basé sur la minimisation des charges polluantes déversées, sans mesure directe de la qualité, est possible. En pratique, la diminution des impacts sur le cours d'eau récepteur peut s'avérer insuffisante pour justifier l'implantation d'un tel système, en particulier lorsque le réseau n'est pas conçu à cet effet.

REFERENCES

- BERON P., BRIERE F., ROUSSELLE J. et J.P. RILEY (1984) An evaluation of some real-time techniques for controlling combined sewer overflows. Proceedings of the third international conference on urban storm drainage, Göteborg, Sweden, p. 1093-1097
- BERON P. (1983) Intégration de la composante qualité dans le contrôle des déversements de réseaux unitaires. Thèse de Ph. D., Ecole Polytechnique de Montréal, 123 p.
- BERON P. et D. RICHARD (1982) Simplified routing in combined or storm interceptors. Urban drainage systems, Proceedings of the first international seminar, Southampton, England, p. 2.67-2.76
- BLANIC R. (1978) La pollution des eaux pluviales : envoi vers l'épuration des flots les plus pollués. T.S.M. - L'eau, vol 73, no 10, p. 471-484
- BOX M.J. (1966) A comparison of several current optimization methods and the use of transformations in constrained problems. The Computer Journal, vol 9, p. 67-77
- BRIERE F. (1983) Etude de l'impact des déversements en temps d'orage sur la qualité des eaux des cours d'eau récepteurs. Le Centre de développement technologique de l'Ecole Polytechnique de Montréal, Projet CDT P689, 118 p.
- BRUECK T.M., PETERSON D.F. et J.A. NYE (1982) Computer-based implementation of combined sewer control. Journal WPCF, vol 54, no 2, p. 198-205
- BURROUGHS D. (1979) Etude du contrôle en temps réel des déversements d'orage pour une utilisation optimale de l'intercepteur nord de la CUM. Communauté Urbaine de Montréal, Service d'assainissement des eaux.
- COWEN W.F., SIRISINHA K. et G.F. LEE (1976) Nitrogen availability in urban runoff. Journal WPCF, vol 48, no 2, p. 339-345
- DESBORDES M. (1979) Modèles de gestion dans le domaine de l'assainissement urbain. Laboratoire d'hydrologie mathématique, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France, rapport no 10/1979, 17 p.
- DROZIER C. (1977) Contrôle de la pollution diffuse : corrélation entre différents paramètres de qualité des eaux d'égout mixtes en temps de pluie : MES-turbidité, DBO₅ - COT. Communauté Urbaine de Montréal, Service d'assainissement des eaux, Division des intercepteurs.

- ELLIS J.B. (1986) Pollutional aspects of urban runoff. Urban runoff pollution, NATO ASI Series, Springer-Verlag, p.1-38
- ELLIS J.B. (1982) Blights and benefits of urban stormwater quality control. Urban drainage systems, Proceedings of the first international seminar, Southampton, England, p.3.39 -3.51
- FIELD R. et C.Y. FAN (1986) The beneficial reclamation of urban storm runoff for subpotable usage. Urban runoff pollution, NATO ASI Series, Springer-Verlag.
- FIELD R. (1984) The USEPA office of research and development's view of combined sewer overflow control. Proceedings of the third international conference on urban storm drainage, p. 1333-1356
- FIELD R. et R. TURKELTAUB (1981) Urban runoff receiving water impacts : Program overview. Journal of the environmental engineering division, ASCE, vol 107, no EE1, p. 83-100
- FIELD R. et R. TURKELTAUB (1980) Don't underestimate urban runoff problems. Water and Wastes Engineering, vol 17, no 10, p. 48-52
- FLORENCE T.M. (1977) Trace metal species in fresh waters. Water Research, vol 11, p. 681-687
- FORSTNER U. et G.T.W. WITTMANN (1981) Metal pollution in the aquatic environment. Springer-Verlag, 2e édition, Berlin, 486 p.
- GEIGER W.F. (1984) Characteristics of combined sewer runoff. Proceedings of the third international conference on urban storm drainage, Göteborg, Sweden, p. 851-860
- GRIGG N.S. et W. SCHILLING (1986) Automating stormwater and combined sewer systems : the possibilities. Water/Engineering and Management, vol 133, no 5, p. 33-35
- HARREMOES P. (1982) Immediate and delayed oxygen depletion in rivers. Water Research, vol 16, p. 1093-1098
- HOOKE R. et T.A. JEEVES (1961) Direct search : solution of numerical and statistical problems. J.A.C.M., vol 8, p. 212-229
- HVITVED-JACOBSEN T. (1986) Conventional pollutant impacts on receiving waters. Urban runoff pollution, NATO ASI Series, Springer-Verlag, p. 345-378

- HVITVED-JACOBSEN T. (1982) The impact of combined sewer overflows on the dissolved oxygen concentration of a river. *Water Research*, vol 16, p. 1099-1105
- ISABEL D., WILSON L. et J.-P. VILLENEUVE (1987) Modèles débit-qualité dans un réseau unitaire en période de pluie. Article soumis pour publication dans la *Revue canadienne de génie civil*.
- KLEMETSON S.L. (1985) Factors affecting stream transport of combined sewer overflow sediments. *Journal WPCF*, vol 57, no 5, p. 390-397
- LABADIE J.W., MORROW D.M. et Y.H. CHEN (1980) Optimal control of unsteady combined sewer flow. *Journal of the water resources planning and management division*, vol 116, no WR1, p. 205-223
- LAVALLEE P. ET P. LESSARD (1984) Importance de la contamination des débordements de réseau unitaire. *Sciences et techniques de l'eau*, vol 17, no 4, p. 353-357
- LAVALLEE P., LESSARD P. et J.P. VILLENEUVE (1984) Water quality variations in running waters due to combined sewer overflowing. Evaluation of negative experience. *Proceedings of the third international conference on urban storm drainage, Göteborg, Sweden*, p. 761-769
- LAVALLEE P. (1980) Les impacts sur les eaux réceptrices de la pollution diffuse urbaine. Thèse de maîtrise, INRS-Eau, 117 p.
- LESSARD P. et P. LAVALLEE (1984) Combined sewer overflows : the Quebec city experience. *Proceeding of the third international conference on urban storm drainage, Göteborg, Sweden*, p. 831-840
- LESSARD P., BERON P., BRIERE F., ROUSSELLE J. et R. DESJARDINS (1982) Variation de la qualité des eaux en temps de pluie dans un réseau unitaire. *La technique de l'eau et de l'assainissement*, no 430/431, p. 9-15
- LESSARD P. (1981) Etude de la qualité des eaux issues des réseaux unitaires en temps de pluie. Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, 113 p.
- LYNARD W.G. et T.R. FIELD (1980) Phosphorus in stormwater : sources and treatability. *Phosphorus management strategies for lakes*, Ann Arbor Science, p. 435-457
- MARCHAND J. (1980) Conception générale d'un réseau de gestion automatisée en assainissement. *T.S.M. - L'eau*, vol 75, no 6, p. 253-258
- MARCHI G. (1981) Etude du contrôle en temps réel d'un intercepteur régional. Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, 106 p.

- MATTHEWS T.M., PITTS P.D. et R.C. LARLHAM (1984) Hydro brake regulated storage for stormwater management. EPA-600/S2-83-097, p. 1-6
- MORROW D.M. et J.W. LABADIE (1980) Urban stormwater control package for automated real-time systems. Proceedings of Canadian Hydrology Symposium, p. 28-39
- NELDER J.A. et R. MEAD (1965) A simplex method for function minimization. The Computer Journal, vol 7, p 308-313
- NGUYEN VAN H.N. et M. OSSEYRANE (1987) Contrôle centralisé des régulateurs de l'intercepteur nord de la Communauté urbaine de Montréal. Sciences et techniques de l'eau, vol 20, no 1, p 37-52
- NGUYEN VAN H.N., OSSEYRANE M. et M.B. MC PHERSON (1982) Integrated control of combined sewer regulators. Journal of the Environmental Engineering Division, vol 108, no EE6, p. 1342-1360
- NOVOTNY V., SUNG H.M., BANNERMAN R. et K. BAUM (1985) Estimating non point pollution from small urban watersheds. Journal WPCF, vol 57, no 4, p. 339-348
- PAPAGEORGIU M. (1983) Automatic control strategies for combined sewer systems. Journal of the Environmental Engineering, vol 109, no 6, p. 1385-1402
- PAQUIN G. (1986) L'interception des eaux usées du territoire de la Communauté urbaine de Montréal. Sciences et techniques de l'eau, vol 19, no 3, p. 249-252
- PATRY G.G. (1986) Operational algorithms for application in real-time control of combined sewer systems. Urban runoff pollution, NATO ASI Series, Springer-Verlag, p. 843-868
- PATRY G.G. et M.A. MARINO (1984) Prédiction de la qualité de l'eau dans les bassins de drainage unitaires. Sciences et techniques de l'eau, vol 17, no 2, p. 159-162
- PATRY G.G. (1983) A linear programming model for the control of combined sewer systems with off-line storage facilities. Canadian Water Resources Journal, vol 8, no 1, p. 83-104
- PATRY G.G., MARCHI G. et J. ROUSSELLE (1982) Prédiction des débits de ruissellement pour le contrôle des réseaux d'égouts unitaires. Can. J. Civ. Eng., vol 9, p. 537-548
- POWELL M.J.D. (1965) A method for minimizing a sum of squares of non-linear functions without calculating derivatives. The Computer Journal, vol 7, p. 303-307

- RANCHET J. et Y. RUPERD (1983) Moyens d'action pour limiter la pollution due aux eaux de ruissellement en système séparatif et unitaire. Trib. Cebedeau, vol 470, no 36, p. 19-35
- RIBSTEIN P. et M. DESBORDES (1978) Etude de la qualité du ruissellement urbain : Synthèse bibliographique. Laboratoire d'hydrologie mathématique, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France, rapport 45/1978, 55 p.
- SCHILLING W. (1986) Urban runoff quality management by real time control. Urban runoff pollution, NATO ASI Series, Springer-Verlag, p. 765-818
- SCHILLINGER J.E. et J.J. GANNON (1985) Bacterial adsorption and suspended particles in urban stormwater. Journal WPCF, vol 57, no 5, p. 384-389
- SNEDECOR G.W. et W.G. COCHRAN (1967) Statistical Methods, Sixth Edition. Iowa State University, 593 p.
- STAHRE P. (1986) Structural measures for runoff quality management. Urban runoff pollution, NATO ASI Series, Springer-Verlag, p. 701-712
- TROTTA P.D., LABADIE J.W. et N.S. GRIGG (1977) Automatic control strategies for urban stormwater. Journal of the hydraulics division, vol 103, no HY 12, p. 1443-1459
- VILLENEUVE J.P. et P. LAVALLEE (1986) Measured CSO contribution to river quality deterioration and methodologic approach for negative influence evaluation. Urban runoff pollution, NATO ASI Series, Springer-Verlag, p. 379-418
- WALLER D.H. et W.C. HART (1986) Solids, nutrients and chlorides in urban runoff. Urban runoff pollution, NATO ASI Series, Springer-Verlag, p. 59-86
- WILBER W.G. et J.V. HUNTER (1979) The impact of urbanization on the distribution of heavy metals in bottom sediments of the Saddle river. Water Resources Bulletin, vol 15, no 3, p. 790-800
- WILBER W.G. et J.V. HUNTER (1979) Distribution of metals in street sweepings, stormwater solids and urban aquatic sediments. Journal WPCF, vol 51, no 12, p. 2810-2822

ANNEXE A

DESCRIPTION DU PROGRAMME PREDIC

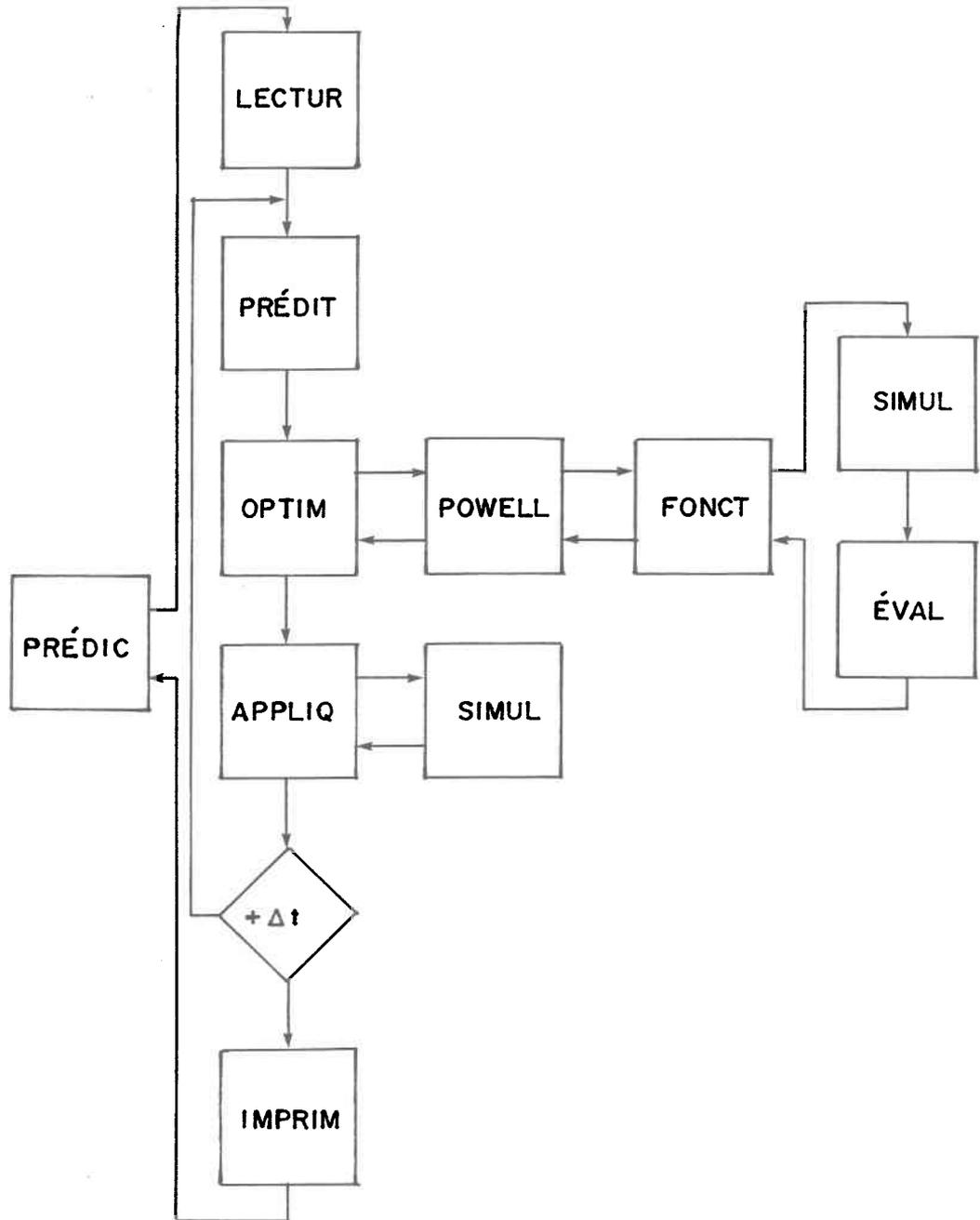
Description du programme PREDIC

Écrit en langage FORTRAN, le programme PREDIC permet de simuler le contrôle en temps réel d'un réseau d'égout unitaire constitué de cinq régulateurs alimentant un tronçon d'intercepteur. La structure modulaire du programme ressemble fortement au schéma d'un algorithme de contrôle prédictif intégré, tel que présenté à la **figure C.4** de l'annexe C. Chacune des tâches est effectuée par un module indépendant, de façon à faciliter le développement du programme et à permettre des modifications rapides d'un des éléments de la boucle de contrôle. La **figure A.1** illustre la structure du programme PREDIC. Un listing du programme est également donné à la fin de cette annexe.

Comme on peut le remarquer sur cette figure, les opérations d'entrée et de sortie sont effectuées en dehors de la boucle d'optimisation. Cette caractéristique requiert l'utilisation de plus de mémoires, mais les simulations vont en retour s'effectuer beaucoup plus rapidement. Ces opérations sont en effet les plus lentes et il faut éviter de les répéter inutilement.

Figure A.1

Structure du programme PREDIC



Le système simulé par le programme PREDIC est composé de cinq tronçons et de cinq régulateurs en série. L'hydrogramme et les pollutogrammes de chacun des collecteurs sont lus dans leur fichier de données respectif. Les caractéristiques du réseau, de même que celles du contrôle sont également lues dans un fichier. Les résultats de la simulation sont envoyés dans deux fichiers, soit un fichier de rapport imprimable et un fichier de transfert pour le programme TABLEAU.

En effet, le fichier de sortie imprimable du programme PREDIC ne contient que le rapport détaillé des résultats concernant le paramètre de qualité utilisé pour le contrôle. Pour connaître les charges déversées, à chaque pas de temps et à chaque régulateur, des autres paramètres de qualité, il suffit d'exécuter le programme TABLEAU à la suite du programme PREDIC.

Toutes les valeurs internes du programme sont en unités de base du système international. Les conversions nécessaires ne se font qu'au moment de la lecture et de l'écriture des fichiers.

Une description succincte de chacun des modules est donnée dans les paragraphes suivants.

Le module PREDIC

Il s'agit du module principal qui dirige l'enchaînement des autres modules. Il n'est constitué en fait que d'une série d'appels aux autres modules.

Le module LECTUR

La tâche principale de ce module consiste à lire le fichier général PARAM.DAT définissant les paramètres de la simulation, ainsi que les fichiers contenant les données des cinq collecteurs. Il est également chargé du calcul de la capacité maximale de chacun des tronçons de l'intercepteur. De plus, il voit à l'initialisation de certaines constantes du système, de même qu'à celle des débits de départ dans les conduites. Un exemple des fichiers d'entrée de ce module est donné aux **tableaux A.1 et A.2**, et leur structure est la suivante :

Fichier des paramètres (PARAM.DAT)

lignes 1 et 2	titre de la simulation
ligne 3	longueur de l'horizon de prédiction
ligne 4	longueur de la simulation
lignes 5 à 9	noms des fichiers de données des collecteurs
ligne 10	numéro du paramètre de contrôle
lignes 11 à 15	longueur, diamètre et pente de chaque tronçon
ligne 16	nom du fichier de rapport

Fichier de données d'un collecteur

lignes 1 et 2	ignorées
lignes 3 et suivantes	temps, débit du collecteur, concentration des cinq paramètres de qualité considérés (MES, DCO, Cu, Pb et Zn)

Le module PREDIT

Ce module est chargé de la prédiction des débits et des concentrations dans les collecteurs. Lorsque les simulations ne font pas intervenir de prédictions, le module va alors transférer les valeurs mesurées dans les variables "prédites".

Le module OPTIM

Ce module organise la recherche du plan d'action optimal. Il calcule les valeurs initiales des paramètres à optimiser, puis fait appel au module POWELL pour exécuter la recherche des valeurs optimales de ces paramètres.

Figure 5.10 **Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 3 pour le bassin 12 et la pluie 3**

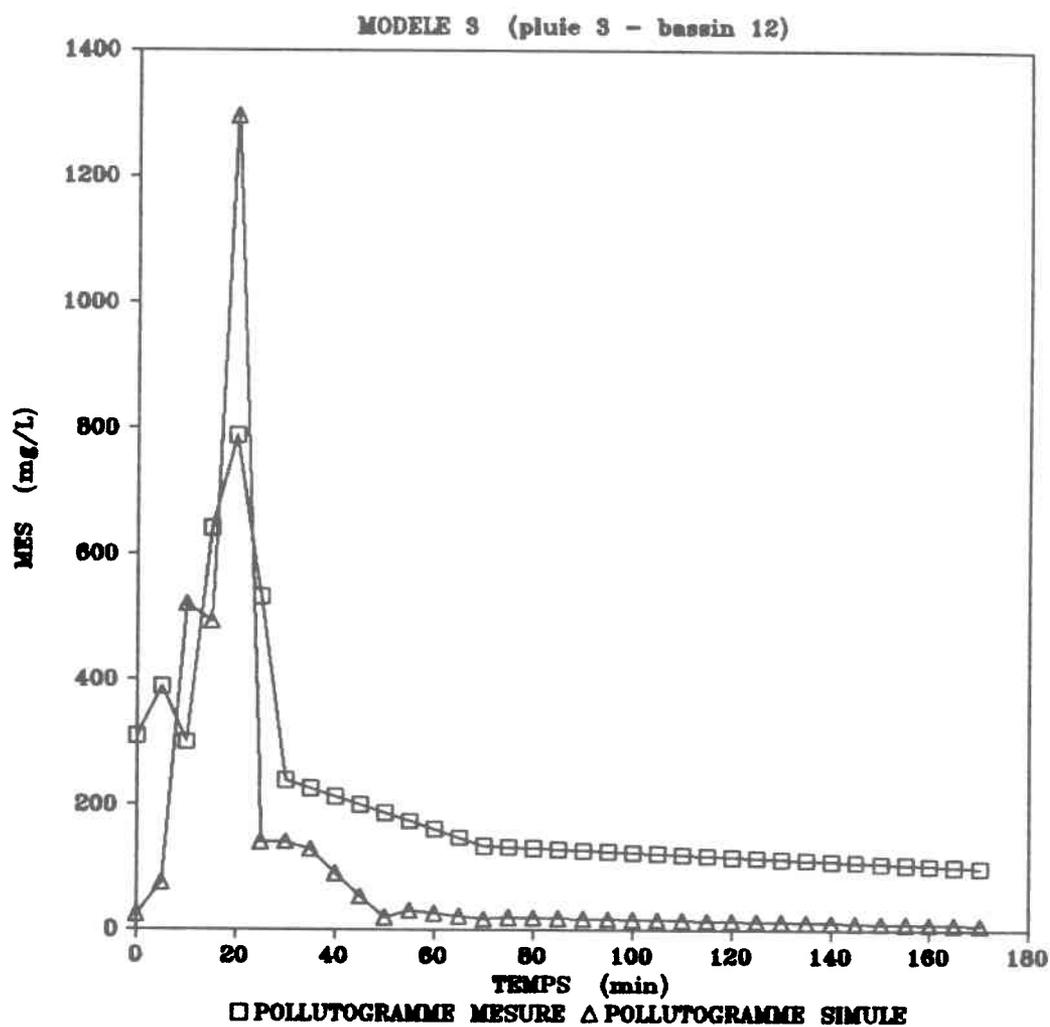


Figure 5.11

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 4 pour le bassin 12 et la pluie 3

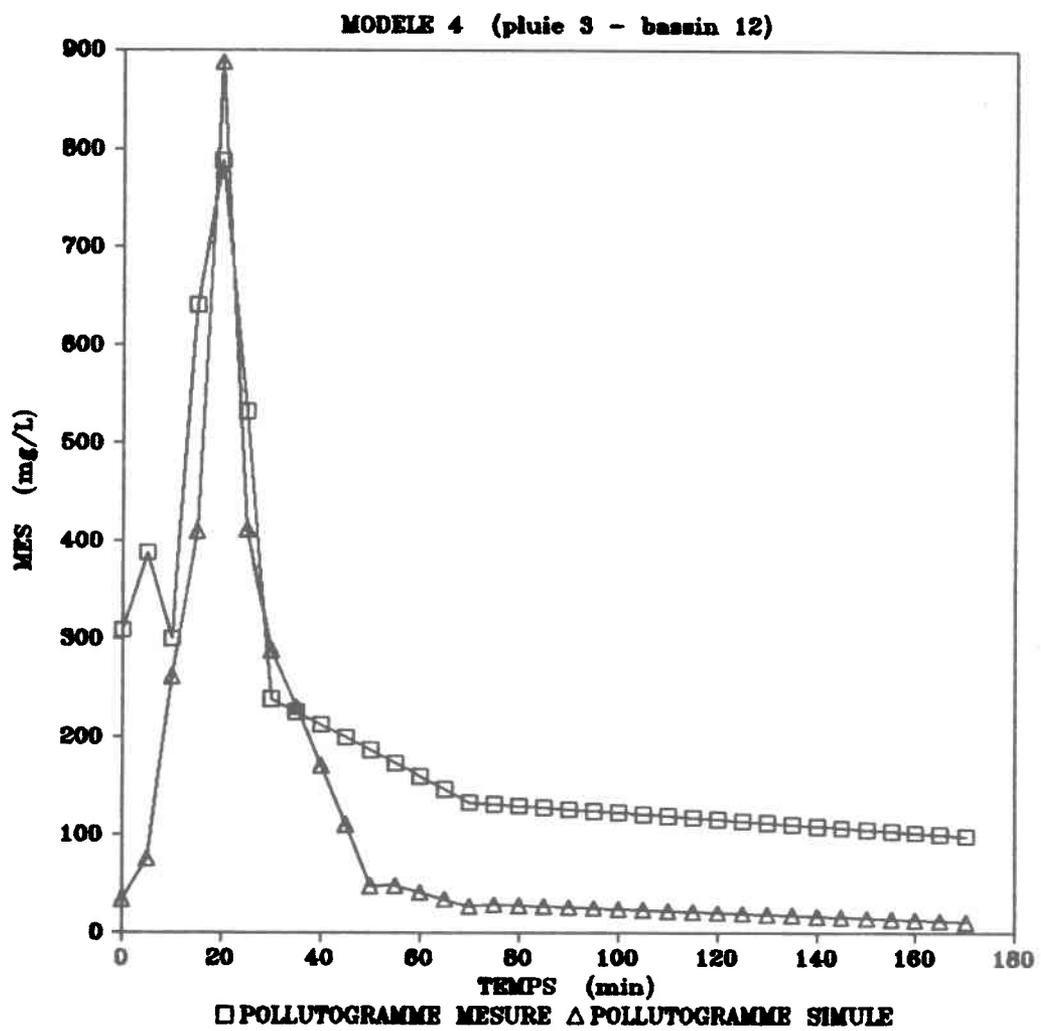


Figure 5.12

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 5 pour le bassin 12 et la pluie 3

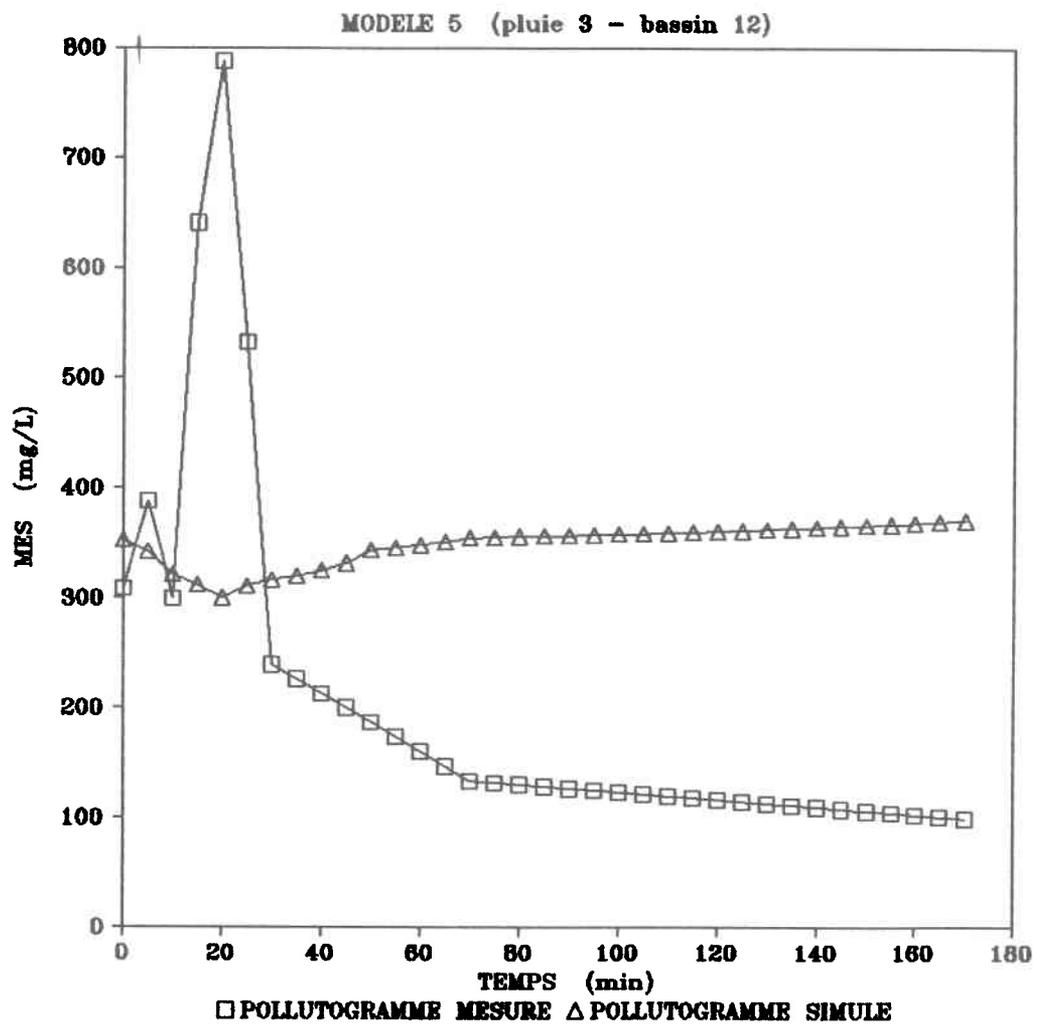


Figure 5.13

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 6 pour le bassin 12 et la pluie 3

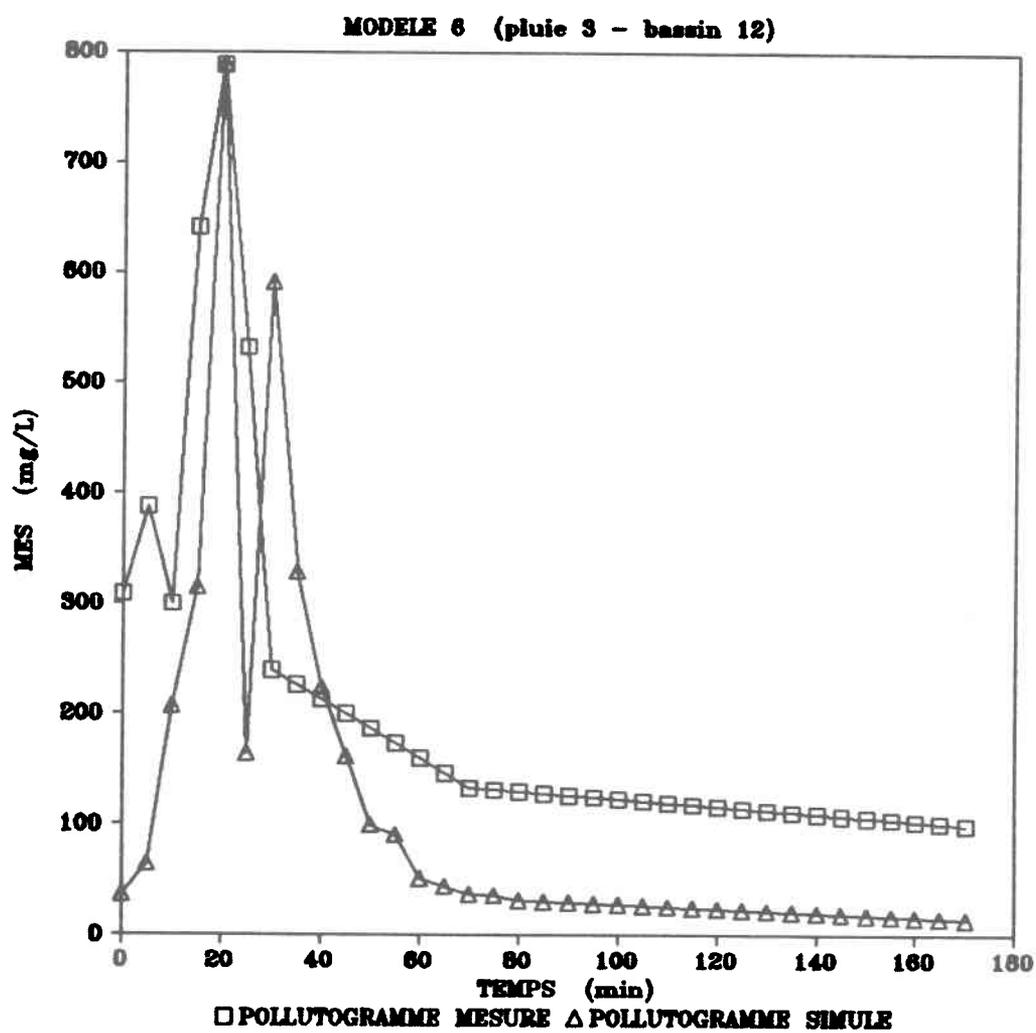
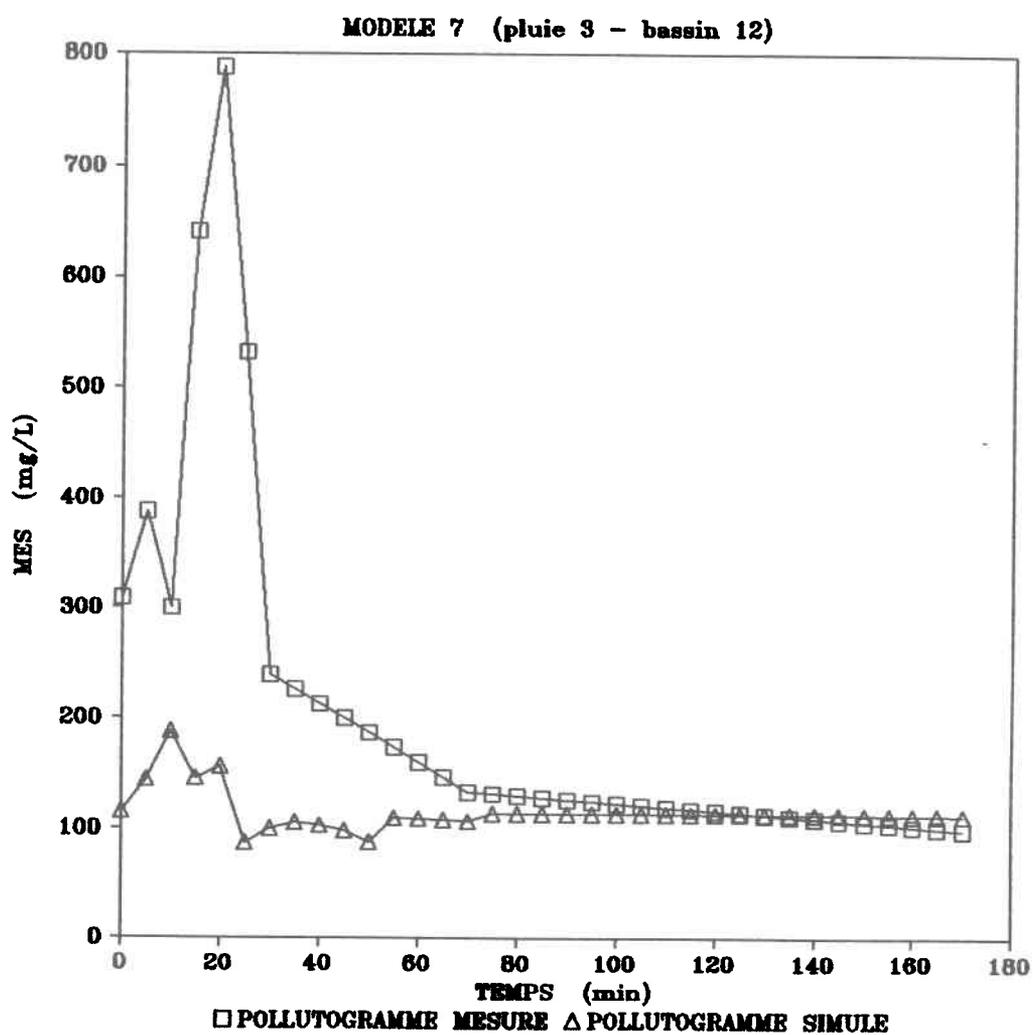


Figure 5.14

Pollutogrammes mesuré et simulé à l'aide du modèle 7 pour le bassin 12 et la pluie 3



5.3 Evaluation des résultats et discussion

5.3.1 Qualité du contrôle obtenu

A) Influence sur les charges de MES déversées

Les résultats des simulations (**tableau 5.15**) nous indiquent que dans une situation où les débordements de réseau sont relativement abondants, le contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées peut réduire les charges de MES déversées dans une proportion de 7 à 20% par rapport à celles obtenues avec un contrôle réactif local. Ceci a été observé pour les pluies 2, 3 et 4. Par contre, lorsqu'il y a très peu de débordements, comme c'est le cas avec les pluies 1 et 5, il devient alors inutile d'effectuer un contrôle prédictif intégré, celui-ci ne pouvant faire mieux qu'un contrôle réactif local.

Lorsqu'on a recours au modèle 2 pour calculer les concentrations de MES issues des collecteurs, on constate que le contrôle prédictif permet de réduire les charges de MES déversées d'environ 3 à 15% par comparaison avec le contrôle réactif local. Ces diminutions ne sont toutefois observées que pour les pluies entraînant des volumes élevés de débordement, et pour lesquelles il existe de nombreuses possibilités de transferts entre les régulateurs. Lorsque les

débordements sont peu abondants, le contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées se révèle moins performant que le contrôle réactif local, avec des augmentations des charges de MES déversées qui vont de 2 à 55%.

De manière générale, on observe donc que le contrôle basé sur les concentrations simulées est toujours moins efficace que celui qui utilise les concentrations mesurées. Cette différence pourrait toutefois être réduite par une calibration des modèles avec des données représentatives sélectionnées.

Lorsqu'on est en présence d'événements pluvieux importants, on constate que le contrôle basé sur les concentrations simulées avec le modèle 2 donne des résultats intermédiaires entre ceux du contrôle réactif local et ceux du contrôle utilisant les concentrations mesurées. Ceci ne devrait toutefois être observé qu'à la condition que la marge entre les résultats de ces deux contrôles soit suffisamment grande pour que les erreurs de prédiction du modèle 2 ne rendent pas le contrôle simulé moins performant que le contrôle réactif local.

Par conséquent, dans une situation où les débordements sont si peu abondants que le contrôle prédictif mesuré et le contrôle réactif local produisent des résultats équivalents, l'emploi du contrôle basé sur les concentrations simulées devient alors défavorable. En effet, comme la marge qui existe entre ces deux types de contrôles est pratiquement nulle, il est à prévoir que le contrôle simulé soit moins efficace que le contrôle réactif local.

Ces constatations nous amènent à penser que la performance du contrôle pourrait être améliorée par la mise en place d'un système qui ne mettrait en fonction le contrôle prédictif simulé que si les débordements excèdent un certain débit prédéterminé. Autrement, ce serait un contrôle réactif local qui serait aux commandes. La valeur de ce débit critique pourrait être déterminée à partir de l'expérience accumulée dans l'opération du système de contrôle en temps réel.

Le contrôle prédictif intégré utilisant les concentrations estimées de MES peut donc diminuer les charges déversées lors d'événements pluvieux importants. Les réductions qui ont été observées ne sont cependant pas considérables. Il reste à savoir si elles soulagent suffisamment le milieu récepteur pour justifier les coûts de la mise en fonction d'un tel contrôle.

B) Influence sur les volumes déversés

Nous avons également compilé les volumes déversés suite à chacun de ces contrôles. Comme on peut le voir au **tableau 5.16**, l'effet du contrôle basé sur les concentrations mesurées de MES est d'augmenter légèrement les volumes de débordement. En effet, pour les pluies 2, 3 et 4, on note des hausses qui vont de 0.4 à 7% par rapport aux volumes déversés dans un contrôle réactif local. Les décisions

de transferts entre régulateurs permettent donc de réduire la charge polluante déversée tout en augmentant quelque peu le volume débordé, étant donné qu'elles favorisent le rejet en plus grande quantité des eaux les moins chargées pour empêcher le rejet de celles qui sont plus chargées.

Quant au contrôle basé sur les concentrations simulées de MES, il cause une augmentation plus marquée des volumes débordés (3 à 13%), tout en diminuant les charges polluantes de façon moins importante. On voit donc que les erreurs de prédiction des modèles de qualité diminuent la performance du contrôle, autant sur le plan qualitatif que sur le plan quantitatif.

Tableau 5.16 Volumes déversés (m³) lors d'un contrôle réactif local, d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES et d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES (modèle 2) ET pourcentages d'augmentation de ces volumes par rapport à ceux obtenus avec un contrôle réactif local

PLUIE	1	2	3	4	5
CR LOCAL	603.37	2219.01	11210.77	17367.23	1287.24
CP MESURE	603.37	2370.15	11260.45	17943.63	1287.37
CP SIMULE	886.51	2500.37	11502.06	18340.53	1291.41
CP MESURE	0.0 %	6.8 %	0.4 %	3.3 %	0.0 %
CP SIMULE	46.9 %	12.7 %	2.6 %	5.6 %	0.3 %

5.3.2 Influence sur les autres paramètres

Pour mieux cerner l'influence du contrôle prédictif utilisant les concentrations simulées de MES sur la qualité du milieu récepteur, nous en avons observé les conséquences sur les autres paramètres de qualité, c'est-à-dire sur les paramètres qui n'étaient pas contrôlés.

On retrouve au **tableau 5.17** les charges déversées de chacun des paramètres de qualité pour les cinq événements pluvieux considérés et suite à trois types de contrôles, soit le contrôle réactif local, le contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES et le contrôle prédictif basé sur les concentrations de MES calculées à l'aide du modèle 2. Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, le **tableau 5.18** présente les pourcentages de réduction de ces charges par rapport au contrôle réactif local.

Tableau 5.17 Charges déversées (kg) de chacun des paramètres lors d'un contrôle réactif local, d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES et d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES

PLUIE	1	2	3	4	5
CR LOCAL					
MES	67.4486	293.6726	5978.1538	1435.3435	256.5148
DCO	119.2699	266.2985	3318.9666	961.3915	185.8636
Cu	0.0292	0.1529	1.6077	0.6521	0.0922
Pb	0.0612	0.3559	4.6618	1.3469	0.1862
Zn	0.1589	0.9039	9.4667	3.0182	1.4353
CP MESURE					
MES	67.4486	236.9193	5546.4492	1205.8928	256.5075
DCO	119.2699	259.7954	3150.5859	896.5029	185.8842
Cu	0.0292	0.1495	1.5449	0.6108	0.0922
Pb	0.0612	0.3002	4.5039	1.2578	0.1862
Zn	0.1589	0.8616	9.2969	3.0234	1.4354
CP SIMULE AVEC LE MODELE 2					
MES	104.2956	253.1109	5790.4131	1298.2891	261.2567
DCO	175.0142	273.6794	3283.9365	951.0371	188.1646
Cu	0.0495	0.1641	1.5997	0.6183	0.0925
Pb	0.0955	0.3416	4.6499	1.3447	0.1915
Zn	0.2440	0.9119	10.1726	3.2577	1.4271

Tableau 5.18 Pourcentages de diminution des charges déversées de chacun des paramètres lors d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES et lors d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES, par rapport à celles obtenues avec un contrôle réactif local

PLUIE	1	2	3	4	5
CP MESURE					
MES	0.0	19.3	7.2	16.0	0.0
DCO	0.0	2.4	5.1	6.7	0.0
Cu	0.0	2.2	3.9	6.3	0.0
Pb	0.0	15.7	3.4	6.6	0.0
Zn	0.0	4.7	1.8	-0.2	0.0
CP SIMULE AVEC LE MODELE 2					
MES	-54.6	13.8	3.1	9.5	-1.8
DCO	-46.7	-2.8	1.1	1.1	-1.2
Cu	-69.5	-7.3	0.5	5.2	-0.3
Pb	-56.0	4.0	0.3	0.2	-2.8
Zn	-53.6	-0.9	-7.5	-7.9	0.6

* Un signe négatif signifie une augmentation des charges déversées

Ce dernier tableau nous montre que le contrôle basé sur les concentrations mesurées de MES ne permet pas une aussi bonne réduction des charges déversées des paramètres non-contrôlés que celle qui est obtenue pour le paramètre de contrôle. En effet, si l'on fait abstraction des pluies 1 et 5 où, comme on l'a dit précédemment, le contrôle prédictif donne des résultats équivalents à ceux du contrôle réactif local, on observe des diminutions des charges déversées des autres paramètres qui vont de 0 à 16%.

En ce qui concerne le contrôle basé sur les concentrations simulées de MES, les résultats sont beaucoup moins satisfaisants. Si l'on ne tient pas compte encore une fois des pluies 1 et 5, on remarque que certaines charges polluantes sont réduites dans des proportions de 0 à 5%, alors que les autres subissent des augmentations pouvant atteindre jusqu'à 8%.

Notons toutefois que les variations observées dans les réductions des charges déversées d'un même paramètre pour différentes pluies nous paraissent assez aléatoires. Aucune tendance ne semble se dégager de ces résultats, si ce n'est que dans l'ensemble, les charges déversées des paramètres non-contrôlés ne sont guère meilleures que celles qui sont obtenues avec un contrôle réactif local. On peut donc dire qu'en moyenne, le contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES ne procure de réduction significative des charges déversées que pour le paramètre de contrôle.

Ce résultat est-il généralisable ? Bien que les données que nous avons utilisées soient limitées, la piètre performance du contrôle prédictif simulé est

compréhensible. L'utilisation de modèles simples ne permet évidemment pas d'obtenir d'aussi bons résultats avec les concentrations simulées qu'avec les concentrations mesurées. De plus, comme les gains observés pour les paramètres non-contrôlés étaient déjà marginaux dans le cas du contrôle utilisant les concentrations mesurées de MES, il n'est pas surprenant de constater qu'ils deviennent pratiquement nuls lorsqu'on utilise un modèle d'estimation des concentrations.

5.3.3 Application à d'autres situations

Est-ce que ces résultats peuvent se généraliser à d'autres réseaux ? Nous ne disposons malheureusement pas de données supplémentaires pouvant nous permettre de vérifier une telle transposition. Cependant, comme il a déjà été mentionné, nous avons dû recourir à un intercepteur fictif car avec les données de la pluie 2 qui ont été utilisées pour la mise au point du système de simulation, le réseau de la ville de Québec ne produisait des débordements qu'à deux endroits seulement. Les possibilités de transferts entre régulateurs étant alors très limitées, le contrôle prédictif intégré était pratiquement inefficace.

Cependant, à titre d'exemple, nous avons également simulé le contrôle prédictif basé sur les concentrations estimées de MES à l'aide du modèle 2 dans le

cas de l'intercepteur du réseau de Québec. Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux 5.19 et 5.20.

Tableau 5.19 Charges déversées (kg) de chacun des paramètres lors d'un contrôle réactif local, d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations mesurées de MES et d'un contrôle prédictif basé sur les concentrations simulées de MES (réseau de Québec)

PLUIE	1	2	3	4	5
CR LOCAL					
MES	116.6678	516.4961	5429.5220	1352.7430	486.6569
DCO	220.4009	305.7534	2929.9719	884.2456	672.8093
Cu	0.0671	0.3080	1.4911	0.6384	0.2572
Pb	0.1394	0.6533	4.1724	1.3884	0.4973
Zn	0.3093	1.5485	8.4229	3.3042	1.3713
CP MESURE					
MES	114.4543	427.5949	5276.3389	1302.1344	444.0028
DCO	213.2784	419.2274	2875.8608	892.7081	657.2343
Cu	0.0688	0.3060	1.4284	0.6276	0.2402
Pb	0.1424	0.6279	4.0684	1.3325	0.4279
Zn	0.3101	1.4383	8.3255	3.1316	1.4453
CP SIMULE AVEC LE MODELE 2					
MES	136.4745	441.2437	5368.5327	1347.6010	478.7195
DCO	244.8817	386.0636	2891.0906	885.7557	657.7532
Cu	0.0775	0.2735	1.4302	0.6393	0.2443
Pb	0.1563	0.6235	4.1188	1.3700	0.4635
Zn	0.3516	1.3954	8.9125	3.2820	1.2673

Le module POWELL

Ce module est une application de la méthode de POWELL pour la minimisation d'une fonction de plusieurs variables. Il s'agit d'un sous-programme d'usage général qu'il est possible d'utiliser directement dans d'autres programmes. Le nombre maximum de paramètres définissant le plan d'action est de 50 et le module les place dans la variable X. Pour évaluer la fonction à minimiser, il fait appel au module FONCT (F,X).

Le module FONCT

Ce module sert à calculer la valeur de la fonction objectif à minimiser. Il fait d'abord appel au module de simulation afin de simuler le contrôle résultant du plan d'action proposé par l'optimisateur, puis il utilise ensuite le module d'évaluation afin de quantifier la performance de ce plan.

Le module EVAL

Le module d'évaluation du plan d'action calcule, à partir des résultats d'une simulation, le total des charges déversées pour toute la durée de l'horizon de prédiction. Ce résultat constitue la fonction que l'optimisateur doit minimiser. D'autres fonctions objectif peuvent également être utilisées.

Le module APPLIQ

Ce module permet d'appliquer, pour un seul pas de temps, le plan d'action optimal retenu par l'optimisateur. Pour ce faire, il utilise le module de simulation, mais en se basant sur les débits et les concentrations mesurés. Ainsi, le plan d'action optimal déterminé à partir des valeurs prédites pour toute la durée de l'horizon de prédiction est maintenant appliqué en faisant intervenir les valeurs réelles mesurées correspondant au pas de temps simulé.

Le module SIMUL

Ce module simule le comportement du réseau lorsque soumis à un plan d'action donné. Cette simulation se déroule un pas de temps à la fois, de la façon suivante. Les débits interceptés et déversés à chaque régulateur sont d'abord calculés à partir des ordres de contrôle reçus et des données mesurées de débit dans les collecteurs et dans l'intercepteur. On procède ensuite au laminage des débits dans l'intercepteur. Ce laminage est effectué d'amont en aval à l'aide d'un modèle d'onde cinématique discrétisé par différences finies. On obtient alors, à chaque régulateur, une équation implicite qui est résolue au moyen de la méthode de Newton. Finalement, les concentrations dans les tronçons sont également laminées à l'aide d'un bilan de masse.

Le module IMPRIM

Ce module écrit le rapport détaillé de la simulation. Celui-ci contient les caractéristiques de la simulation, ainsi que les résultats obtenus, à chaque pas de temps, au niveau de chacun des régulateurs et de chacun des tronçons. Un exemple de ce rapport est donné au **tableau A.3**.

Tableau A.1

Fichier général PARAM.DAT

Simulation: CPI - minimisation des charges mesurees de MES
reseau fictif - pluie 2

4
27
PP5BB2.DON
PP5BB11.DON
PP5BB12.DON
PP5BB14.DON
PP5BB7.DON
1
500, 915, 0.0017
500, 1220, 0.00065
500, 1220, 0.0015
500, 1525, 0.00063
500, 1525, 0.00092
CM04.RES

Tableau A.2

Fichier PP2BB2.DON contenant les données du premier collecteur (bassin 2) pour la pluie du 22 juin 1982

TEMPS	Q*	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
0	, 72.6	, 82.0	, 706.0	, 128.0	, 23.0	, 240.0
5	, 86.5	, 74.3	, 725.3	, 138.7	, 228.7	, 413.3
10	, 100.5	, 66.7	, 744.7	, 149.3	, 434.3	, 586.7
15	, 114.4	, 59.0	, 764.0	, 160.0	, 640.0	, 760.0
20	, 473.0	, 88.0	, 431.0	, 308.0	, 230.0	, 568.0
25	, 666.6	, 243.0	, 413.0	, 214.0	, 290.0	, 530.0
30	, 734.8	, 191.0	, 225.0	, 120.0	, 197.0	, 386.0
35	, 860.2	, 158.0	, 132.0	, 80.0	, 167.0	, 340.0
40	, 915.2	, 114.0	, 51.0	, 70.0	, 154.0	, 540.0
45	, 843.7	, 124.0	, 160.0	, 67.5	, 145.0	, 653.0
50	, 772.2	, 134.0	, 269.0	, 65.0	, 136.0	, 766.0
55	, 630.3	, 114.0	, 161.5	, 58.0	, 118.5	, 516.0
60	, 488.4	, 94.0	, 54.0	, 51.0	, 101.0	, 266.0
65	, 445.5	, 82.8	, 56.7	, 49.5	, 93.0	, 252.7
70	, 402.6	, 71.7	, 59.3	, 48.0	, 85.0	, 239.3
75	, 359.7	, 60.5	, 62.0	, 46.5	, 77.0	, 226.0
80	, 316.8	, 49.3	, 64.7	, 45.0	, 69.0	, 212.7
85	, 273.9	, 38.2	, 67.3	, 43.5	, 61.0	, 199.3
90	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0
95	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0
100	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0
105	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0
110	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0
115	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0
120	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0
125	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0
130	, 231.0	, 27.0	, 70.0	, 42.0	, 53.0	, 186.0

Tableau A.3

Exemple de rapport des résultats d'une simulation

=====
Resultat de simulation
Programme PREDIC
=====

Simulation: CPI - minimisation des charges mesurees de MES
reseau fictif - pluie 2

Simulation debute a 08:53:56
Simulation termine a 09:08:45

Parametre de controle: MES mg/L
Horizon de prediction: 4 pas de temps
Duree de la simulation: 27 pas de temps

Charge totale deversee: 236.9193 kg
Volume total deverse: 2370.15 m3

REGULATEUR No 1
Fichier de donnees:PP2BB2.DON

CARACTERISTIQUES DU TRONCON

Diametre : 915. mm
Longueur : 500.0 m
Pente : .00170
Debit maximal : 825.9 L/s

TEMPS (min)	Q COLL (L/s)	Q REGUL (L/s)	Q DEVER (L/s)	Q AMONT (L/s)	Q AVAL (L/s)	[] COLL (mg/L)	[] AMONT (mg/L)	[] AVAL (mg/L)	CHARGE DEVER (kg)
0.	72.6	72.6	0.0	444.7	407.4	82.0	13.4	6.1	0.0000
5.	86.5	86.5	0.0	458.6	432.6	74.3	14.0	9.6	0.0000
10.	100.5	100.5	0.0	472.6	452.4	66.7	14.2	11.6	0.0000
15.	114.4	114.4	0.0	486.5	469.3	59.0	13.9	12.6	0.0000
20.	473.0	399.3	73.7	771.4	622.8	88.0	45.6	30.6	1.9449
25.	666.6	453.8	212.8	825.9	728.8	243.0	133.5	83.4	15.5144
30.	734.8	453.8	281.0	825.9	780.2	191.0	104.9	93.8	16.1023
35.	860.2	453.8	406.4	825.9	804.5	158.0	86.8	90.5	19.2642
40.	915.2	453.8	461.4	825.9	815.9	114.0	62.6	77.5	15.7805
45.	843.7	453.8	389.9	825.9	821.2	124.0	68.1	73.2	14.5050
50.	772.2	453.8	318.4	825.9	823.7	134.0	73.6	73.4	12.8004
55.	630.3	453.8	176.5	825.9	824.9	114.0	62.6	68.4	6.0369
60.	488.4	0.0	488.4	372.1	587.4	94.0	0.0	49.4	13.7729
65.	445.5	0.0	445.5	372.1	478.3	82.8	0.0	33.1	11.0662
70.	402.6	0.0	402.6	372.1	425.6	71.7	0.0	21.0	8.6599
75.	359.7	0.0	359.7	372.1	399.4	60.5	0.0	12.9	6.5286
80.	316.8	0.0	316.8	372.1	386.1	49.3	0.0	7.8	4.6855
85.	273.9	0.0	273.9	372.1	379.3	38.2	0.0	4.6	3.1389
90.	231.0	0.0	231.0	372.1	375.8	27.0	0.0	2.8	1.8711
95.	231.0	0.0	231.0	372.1	374.0	27.0	0.0	1.6	1.8711
100.	231.0	0.0	231.0	372.1	373.1	27.0	0.0	1.0	1.8711
105.	231.0	231.0	0.0	603.1	486.4	27.0	10.3	5.9	0.0000
110.	231.0	231.0	0.0	603.1	545.3	27.0	10.3	8.0	0.0000
115.	231.0	231.0	0.0	603.1	574.8	27.0	10.3	9.1	0.0000
120.	231.0	231.0	0.0	603.1	589.3	27.0	10.3	9.7	0.0000
125.	231.0	231.0	0.0	603.1	596.4	27.0	10.3	10.0	0.0000
130.	231.0	231.0	0.0	603.1	599.8	27.0	10.3	10.1	0.0000

Charge totale deversee : 155.4139 kg
Volume total deverse : 1590.03 m3

REGULATEUR No 2
 Fichier de donnees:PP2BB11.DON

CARACTERISTIQUES DU TRONCON

Diametre : 1220. mm
 Longueur : 500.0 m
 Pente : .00065
 Debit maximal : 1099.8 L/s

TEMPS (min)	Q COLL (L/s)	Q REGUL (L/s)	Q DEVER (L/s)	Q AMONT (L/s)	Q AVAL (L/s)	[] COLL (mg/L)	[] AMONT (mg/L)	[] AVAL (mg/L)	CHARGE DEVER (kg)
0.	62.0	62.0	0.0	469.4	410.8	31.0	9.4	3.5	0.0000
5.	135.0	135.0	0.0	567.6	474.3	84.5	27.4	13.2	0.0000
10.	208.0	208.0	0.0	660.4	551.3	138.0	51.4	29.2	0.0000
15.	208.0	208.0	0.0	677.3	604.5	168.5	60.5	41.6	0.0000
20.	208.0	208.0	0.0	830.8	701.7	199.0	72.8	55.0	0.0000
25.	371.0	371.0	0.0	1099.8	877.5	178.0	115.3	83.4	0.0000
30.	371.0	319.6	51.4	1099.8	978.0	177.0	118.0	98.3	2.7276
35.	314.0	295.3	18.7	1099.8	1033.7	147.0	105.7	101.3	0.8245
40.	258.0	258.0	0.0	1073.9	1052.2	131.5	90.5	97.0	0.0000
45.	202.0	202.0	0.0	1023.2	1038.9	116.0	81.6	91.2	0.0000
50.	180.5	180.5	0.0	1004.2	1023.0	99.5	78.1	86.2	0.0000
55.	159.0	159.0	0.0	983.9	1005.1	83.0	70.8	80.4	0.0000
60.	293.5	293.5	0.0	880.9	948.5	103.0	67.3	75.8	0.0000
65.	428.0	428.0	0.0	906.3	929.4	123.0	75.5	75.7	0.0000
70.	466.0	466.0	0.0	891.6	912.4	151.0	88.9	80.6	0.0000
75.	504.0	504.0	0.0	903.4	908.3	179.0	105.6	90.0	0.0000
80.	521.0	521.0	0.0	907.1	907.8	204.0	120.5	101.5	0.0000
85.	530.0	530.0	0.0	909.3	908.5	165.0	98.1	100.2	0.0000
90.	456.0	456.0	0.0	831.8	874.0	159.0	88.4	96.0	0.0000
95.	388.0	388.0	0.0	762.0	824.0	151.5	77.9	89.8	0.0000
100.	320.0	320.0	0.0	693.1	766.1	144.0	67.0	82.2	0.0000
105.	303.8	303.8	0.0	790.2	776.7	125.0	51.7	70.8	0.0000
110.	287.6	287.6	0.0	832.9	801.5	106.0	41.9	59.6	0.0000
115.	271.4	271.4	0.0	846.2	821.3	87.0	34.1	49.9	0.0000
120.	255.2	255.2	0.0	844.5	831.6	68.0	27.3	41.3	0.0000
125.	239.0	239.0	0.0	835.4	833.3	49.0	21.1	33.8	0.0000
130.	239.0	239.0	0.0	838.8	835.8	49.0	21.2	29.1	0.0000

Charge totale deversee : 3.5521 kg
 Volume total deverse : 21.02 m3

REGULATEUR No 3
 Fichier de donnees:PP2BB12.DON

CARACTERISTIQUES DU TRONCON

Diametre : 1220. mm

Longueur : 500.0 m

Pente : .00150

Debit maximal : 1670.7 L/s

TEMPS (min)	Q COLL (L/s)	Q REGUL (L/s)	Q DEVER (L/s)	Q AMONT (L/s)	Q AVAL (L/s)	[] COLL (mg/L)	[] AMONT (mg/L)	[] AVAL (mg/L)	CHARGE DEVER (kg)
0.	71.0	71.0	0.0	481.8	424.1	333.0	52.1	23.9	0.0000
5.	580.5	580.5	0.0	1054.8	738.2	310.5	176.8	120.0	0.0000
10.	1090.5	1090.5	0.0	1641.8	1218.8	288.0	201.1	171.6	0.0000
15.	1051.0	1051.0	0.0	1655.5	1460.2	200.0	142.1	155.4	0.0000
20.	939.0	939.0	0.0	1640.7	1561.4	162.0	116.2	135.3	0.0000
25.	827.0	793.3	33.7	1670.7	1623.0	124.0	102.7	118.8	1.2545
30.	704.0	692.8	11.2	1670.7	1650.0	112.0	104.0	111.4	0.3769
35.	581.0	0.0	581.0	1033.7	1305.5	100.0	101.3	107.6	17.4300
40.	666.0	618.6	47.4	1670.7	1508.6	101.0	98.5	102.7	1.4370
45.	637.7	631.9	5.8	1670.7	1599.8	95.3	92.7	97.6	0.1667
50.	609.3	609.3	0.0	1632.3	1618.1	89.7	87.5	92.6	0.0000
55.	581.0	581.0	0.0	1586.1	1600.0	84.0	81.7	87.3	0.0000
60.	745.0	722.2	22.8	1670.7	1640.0	72.0	74.1	80.7	0.4922
65.	935.0	741.3	193.7	1670.7	1657.4	119.0	94.9	87.8	6.9144
70.	950.5	758.4	192.1	1670.7	1665.0	111.5	94.6	91.1	6.4264
75.	966.0	762.4	203.6	1670.7	1668.2	104.0	96.4	93.7	6.3517
80.	981.5	763.0	218.5	1670.7	1669.7	96.5	99.2	96.4	6.3265
85.	997.0	762.3	234.7	1670.7	1670.3	89.0	95.1	95.8	6.2671
90.	717.0	630.0	87.0	1504.0	1576.3	79.0	88.9	92.6	2.0612
95.	660.0	462.7	197.3	1286.7	1414.2	75.0	84.5	89.0	4.4395
100.	569.5	569.5	0.0	1335.6	1370.6	65.5	75.1	82.5	0.0000
105.	479.0	479.0	0.0	1255.7	1307.1	56.0	65.1	74.6	0.0000
110.	444.4	444.4	0.0	1245.9	1273.4	53.8	57.6	66.7	0.0000
115.	409.8	409.8	0.0	1231.1	1250.2	51.6	50.4	59.1	0.0000
120.	375.2	375.2	0.0	1206.8	1226.4	49.4	43.8	52.0	0.0000
125.	340.6	340.6	0.0	1173.9	1197.7	47.2	37.7	45.4	0.0000
130.	306.0	306.0	0.0	1141.8	1167.2	45.0	33.3	39.9	0.0000

Charge totale deversee : 59.9441 kg

Volume total deverse : 608.67 m3

REGULATEUR No 4
 Fichier de donnees:PP2BB14.DON

CARACTERISTIQUES DU TRONCON

Diametre : 1525. mm
 Longueur : 500.0 m
 Pente : .00063
 Debit maximal : 1963.2 L/s

TEMPS (min)	Q COLL (L/s)	Q REGUL (L/s)	Q DEVER (L/s)	Q AMONT (L/s)	Q AVAL (L/s)	[] COLL (mg/L)	[] AMONT (mg/L)	[] AVAL (mg/L)	CHARGE DEVER (kg)
0.	55.0	55.0	0.0	479.1	414.2	71.0	29.3	11.1	0.0000
5.	116.0	116.0	0.0	854.2	594.0	176.0	127.6	69.5	0.0000
10.	195.0	195.0	0.0	1413.8	950.9	468.0	212.4	149.6	0.0000
15.	167.0	167.0	0.0	1627.2	1261.2	322.5	172.6	161.3	0.0000
20.	139.0	139.0	0.0	1700.4	1468.7	177.0	138.7	150.7	0.0000
25.	187.0	187.0	0.0	1810.0	1632.8	234.0	130.7	141.6	0.0000
30.	194.5	194.5	0.0	1844.5	1735.8	186.5	119.3	131.8	0.0000
35.	202.0	202.0	0.0	1507.5	1624.8	139.0	111.8	124.2	0.0000
40.	230.0	230.0	0.0	1738.6	1680.0	113.0	104.1	115.6	0.0000
45.	231.0	0.0	231.0	1599.8	1641.0	110.7	97.6	108.4	7.6715
50.	232.0	162.9	69.1	1781.1	1709.1	108.3	94.1	102.2	2.2437
55.	233.0	233.0	0.0	1833.0	1769.6	106.0	89.7	96.8	0.0000
60.	162.0	162.0	0.0	1802.0	1785.5	84.0	81.0	90.2	0.0000
65.	203.0	203.0	0.0	1860.4	1822.2	82.0	87.1	88.9	0.0000
70.	228.0	228.0	0.0	1893.0	1857.0	81.5	90.0	89.4	0.0000
75.	253.0	253.0	0.0	1921.2	1888.7	81.0	92.1	90.5	0.0000
80.	278.0	278.0	0.0	1947.7	1917.8	80.5	94.2	92.1	0.0000
85.	303.0	292.9	10.1	1963.2	1940.3	80.0	93.4	92.6	0.2422
90.	453.0	386.9	66.1	1963.2	1951.6	97.0	93.4	93.0	1.9249
95.	549.0	549.0	0.0	1963.2	1957.4	105.0	93.5	93.2	0.0000
100.	596.0	592.6	3.4	1963.2	1960.2	117.5	93.1	93.1	0.1193
105.	643.0	643.0	0.0	1950.1	1955.2	130.0	92.8	93.0	0.0000
110.	643.0	643.0	0.0	1916.4	1936.0	130.0	87.9	90.9	0.0000
115.	643.0	643.0	0.0	1893.2	1914.8	130.0	83.2	87.7	0.0000
120.	643.0	643.0	0.0	1869.4	1892.4	130.0	78.8	84.0	0.0000
125.	643.0	643.0	0.0	1840.7	1866.9	130.0	74.9	80.3	0.0000
130.	643.0	643.0	0.0	1810.2	1839.0	130.0	71.9	76.8	0.0000

Charge totale deversee : 12.2015 kg
 Volume total deverse : 113.90 m3

REGULATEUR No 5
 Fichier de donnees:PP2BB7.DON

CARACTERISTIQUES DU TRONCON

Diametre : 1525. mm
 Longueur : 500.0 m
 Pente : .00092
 Debit maximal : 2372.4 L/s

TEMPS (min)	Q COLL (L/s)	Q REGUL (L/s)	Q DEVER (L/s)	Q AMONT (L/s)	Q AVAL (L/s)	[] COLL (mg/L)	[] AMONT (mg/L)	[] AVAL (mg/L)	CHARGE DEVER (kg)
0.	92.4	92.4	0.0	506.6	429.8	96.0	26.6	11.3	0.0000
5.	103.1	103.1	0.0	697.1	547.7	98.7	73.8	41.2	0.0000
10.	113.6	113.6	0.0	1064.5	785.9	101.3	144.4	96.9	0.0000
15.	124.3	124.3	0.0	1385.5	1075.2	104.0	156.1	128.8	0.0000
20.	234.3	234.3	0.0	1703.0	1389.6	952.0	261.0	199.1	0.0000
25.	311.3	311.3	0.0	1944.1	1675.2	61.0	128.7	162.7	0.0000
30.	374.0	374.0	0.0	2109.8	1903.4	154.0	135.8	149.1	0.0000
35.	822.8	747.6	75.2	2372.4	2153.5	178.0	141.2	145.1	4.0173
40.	676.5	676.5	0.0	2356.5	2262.9	186.0	135.8	140.6	0.0000
45.	704.0	704.0	0.0	2345.0	2307.3	186.0	131.7	136.4	0.0000
50.	663.3	663.3	0.0	2372.4	2342.6	162.0	118.9	128.1	0.0000
55.	622.6	602.8	19.8	2372.4	2358.8	138.0	107.3	118.3	0.8209
60.	457.1	457.1	0.0	2242.6	2295.8	100.5	92.3	106.5	0.0000
65.	291.5	291.5	0.0	2113.7	2197.5	63.0	85.3	97.0	0.0000
70.	401.0	401.0	0.0	2258.0	2230.1	92.0	89.8	93.7	0.0000
75.	510.4	483.7	26.7	2372.4	2307.0	121.0	96.7	95.1	0.9696
80.	443.9	443.9	0.0	2361.7	2336.7	105.0	94.5	94.8	0.0000
85.	377.3	377.3	0.0	2317.6	2326.3	89.0	92.1	93.5	0.0000
90.	310.8	310.8	0.0	2262.4	2291.7	73.0	90.2	92.0	0.0000
95.	244.2	244.2	0.0	2201.6	2243.0	57.0	89.2	90.7	0.0000
100.	244.2	244.2	0.0	2204.4	2222.2	57.0	89.1	90.0	0.0000
105.	244.2	244.2	0.0	2199.4	2209.9	57.0	89.0	89.5	0.0000
110.	244.2	244.2	0.0	2180.2	2193.9	57.0	87.1	88.4	0.0000
115.	244.2	244.2	0.0	2159.0	2175.1	57.0	84.2	86.5	0.0000
120.	244.2	244.2	0.0	2136.6	2154.4	57.0	80.9	83.9	0.0000
125.	244.2	244.2	0.0	2111.1	2131.2	57.0	77.6	81.0	0.0000
130.	244.2	244.2	0.0	2083.2	2105.4	57.0	74.5	78.1	0.0000

Charge totale deversee : 5.8078 kg
 Volume total deverse : 36.53 m3

LISTING DES PROGRAMMES

PROGRAM PREDIC

```
*      Simulateur de reseau controle automatiquement

*      Ce programme simule un reseau unitaire simplifie comprenant 5
*      troncons et 5 regulateurs en serie. Les hydrogrammes et les
*      pollutogrammes des collecteurs sont lus dans des fichiers de
*      donnees; de meme que les caracteristiques du reseau et les
*      parametres definissant le controle. Les resultats de la
*      simulation sont envoyes dans deux fichiers: un fichier de
*      rapport imprimable et un fichier de transfert pour le programme
*      TABLEAU.

*      Toutes les valeurs internes du programme sont en unites de base
*      du systeme international. Les conversions necessaires se font a
*      la lecture et a l'ecriture seulement.

      INTEGER I,J,HP,LS
*  i          numero du collecteur/troncon/regulateur
*  j          numero du pas de temps
*  hp         horizon de prediction
*  ls        longueur de la simulation

      REAL QCOL(5,100),CCOL(5,100),QPRE(5,10),CPRE(5,10)
      REAL QREG(5,100),QDEV(5,100)
      REAL QAMONT(5,100),QAVAl(5,100),AAMONT(5,100),AAVAL(5,100)
      REAL CAMONT(5,100),CAVAL(5,100)
      REAL LONG(5),DIAM(5),PENTE(5)
      REAL TEMPS(100)
      REAL QMAX(5)
      REAL CMANN,ALPHA,BETA,DT
      REAL SETPT(5,10)
*  qcol(i,j)  debit reel au collecteur
*  ccol(i,j)  concentration reelle au collecteur
*  qpre(i,k)  debit predit au collecteur
*  cpre(i,k)  concentration predite au collecteur
*  qreg(i,j)  debit regule
*  qdev(i,j)  debit deverse
*  qamont(i,j) debit amont dans l'intercepteur
*  qaval(i,j) debit aval dans l'intercepteur
```

```

* aamont(i,j)  aire amont dans l'intercepteur
* aaval(i,j)   aire aval dans l'intercepteur
* camont(i,j)  concentration amont dans l'intercepteur
* cavat(i,j)   concentration aval dans l'intercepteur
* long(i)      longueur du troncon
* diam(i)      diametre du troncon
* pente(i)     pente du troncon
* temps(j)     temps en minutes
* qmax(i)      debit maximal des troncons
* cmann        coefficient de Manning
* alpha        coefficient
* beta         coefficient
* dt           longueur du pas de temps kt
* setpt(i,k)   trajectoire de controle (plan d'action)

```

```

CHARACTER*80 TITRE1,TITRE2
CHARACTER*12 FICH(5),RESULT
CHARACTER*10 DEBUT,FIN
CHARACTER*4 PARAM,UNIT

```

```

* titre1      titre de la simulation
* titre2      sous-titre de la simulation
* fichier(i)  noms des fichiers de donnee des collecteurs
* result      nom du fichier resultat
* debut       temps du debut de la simulation
* fin         temps de la fin de la simulation
* param       nom du parametre de controle
* unit        unites du parametre de controle

```

```

COMMON /INTER/TITRE1,TITRE2,FICH,PARAM,UNIT,RESULT
COMMON /ETAT/I,J,HP,LS,
+          QCOL,CCOL,QPRE,CPRE,QREG,QDEV,
+          QAMONT,QAVAT,AAMONT,AAVAL,CAMONT,CAVAL,
+          LONG,DIAM,PENTE,TEMPS,QMAX,
+          CMANN,ALPHA,BETA,DT

```

```

* Lecture des donnees
  CALL LECTUR

```

```

* Debut des iterations
  OPEN (1,FILE='CONTROL.TEM',STATUS='NEW',FORM='UNFORMATTED')
  OPEN (2,FILE='CONVERG.COU',STATUS='NEW')
  CALL TIME(DEBUT)
  DO 10 J=1,LS
    WRITE(2,*) 'PAS DE TEMPS=',J

```

```

* Calcul des predictions
  CALL PREDIT

```

```

* Optimisation du plan d'action
  CALL OPTIM(SETPT)

* Application du plan d'action optimal
  CALL APPLIQ(SETPT)

* Impression des donnees pour le programme TABLEAU
  WRITE (1) (QDEV(I,J),I=1,5)

* Fin des iterations
  WRITE (*,'(I5,5F8.4)') J,(QREG(I,J),I=1,5)
  WRITE (*,*) CHAR(7)
10  CONTINUE
  CLOSE (1)
  CLOSE (2)
  CALL TIME(FIN)

* Impression des resultats
  CALL IMPRIM(DEBUT,FIN)
  DO 20 K=1,20
20  WRITE (*,*) CHAR(7)

  STOP
  END

```

SUBROUTINE LECTUR

```

*   Sous-programme qui lit les donnees de la simulation

*   Ce sous-programme lit le fichier contenant les parametres de la
*   simulation, ainsi que les fichiers de donnees des collecteurs.
*   Le nom du parametre de controle y est determine, de meme que la
*   capacite maximale de chacun des troncons de l'intercepteur.
*   Le module specifie egalement les valeurs de certains parametres
*   et il initialise les debits dans les conduites.

  INTEGER I,J,HP,LS,NPAR
* i      numero du collecteur/troncon/regulateur
* j      numero du pas de temps
* hp     horizon de prediction
* ls     longueur de la simulation
* npar   numero du parametre de controle

  REAL QCOL(5,100),CCOL(5,100),QPRE(5,10),CPRE(5,10)

```

```

REAL QREG(5,100),QDEV(5,100)
REAL QAMONT(5,100),QAVAl(5,100),AAMONT(5,100),AAVAL(5,100)
REAL CAMONT(5,100),CAVAL(5,100)
REAL LONG(5),DIAM(5),PENTE(5)
REAL TEMPS(100)
REAL QMAX(5)
REAL CMANN,ALPHA,BETA,DT
REAL BIDON(5)
* qcol(i,j)    debit reel au collecteur
* ccol(i,j)    concentration reelle au collecteur
* qpre(i,k)    debit predict au collecteur
* cpre(i,k)    concentration predite au collecteur
* qreg(i,j)    debit regule
* qdev(i,j)    debit deverse
* qamont(i,j)  debit amont dans l'intercepteur
* qaval(i,j)   debit aval dans l'intercepteur
* aamont(i,j)  aire amont dans l'intercepteur
* aaval(i,j)   aire aval dans l'intercepteur
* camont(i,j)  concentration amont dans l'intercepteur
* caval(i,j)   concentration aval dans l'intercepteur
* long(i)      longueur du troncon
* diam(i)      diametre du troncon
* pente(i)     pente du troncon
* temps(j)     temps en minutes
* qmax(i)      debit maximal des troncons
* cmann        coefficient de Manning
* alpha        coefficient
* beta         coefficient
* dt           longueur du pas de temps kt
* bidon()      tampon pour les concentrations

CHARACTER*80 TITRE1,TITRE2
CHARACTER*12 FICH(5),RESULT
CHARACTER*4 PARAM,UNIT,NOMS(5)
* titre1      titre de la simulation
* titre2      sous-titre de la simulation
* fich(i)     noms des fichiers de donnee des collecteurs
* result      nom du fichier resultat
* param       nom du parametre de controle
* unit        unites du parametre de controle
* noms        noms des parametres

COMMON /INTER/TITRE1,TITRE2,FICH,PARAM,UNIT,RESULT
COMMON /ETAT/I,J,HP,LS,
+           QCOL,CCOL,QPRE,CPRE,QREG,QDEV,
+           QAMONT,QAVAl,AAMONT,AAVAL,CAMONT,CAVAL,
+           LONG,DIAM,PENTE,TEMPS,QMAX,
+           CMANN,ALPHA,BETA,DT

```

```

* Constantes pour conduites circulaires en beton
  CMANN=0.013
  ALPHA=0.54
  BETA=1.35
  DT=300.0

* Lecture du fichier general de donnees PARAM
  OPEN (1,FILE='PARAM',STATUS='OLD')
  READ (1,'(A80)') TITRE1
  READ (1,'(A80)') TITRE2
  READ (1,'(BN,I3)') HP
  READ (1,'(BN,I3)') LS
  DO 10 I=1,5
10    READ (1,'(A12)') FICH(I)
      READ (1,'(BN,I3)') NPAR
      DO 20 I=1,5
20    READ (1,*) LONG(I),DIAM(I),PENDE(I)
      DIAM(I)=DIAM(I)/1000.0
      READ (1,'(A12)') RESULT
      CLOSE (1)

* Determination du nom du parametre de controle
  DATA NOMS/' MES',' DCO',' Cu ',' Pb ',' Zn '/
  PARAM=NOMS(NPAR)
  IF (NPAR.LE.2) THEN
    UNIT='mg/L'
  ELSE
    UNIT='ug/L'
  ENDIF

* Calcul des capacites des conduites
  DO 30 I=1,5
30    QMAX(I)=DIAM(I)**(8./3.)*0.33*SQRT(PENDE(I))/CMANN

* Lecture des fichiers de donnees des collecteurs
  DO 40 I=1,5
    OPEN (1,FILE=FICH(I),STATUS='OLD')
    READ (1,*)
    READ (1,*)
    J=1
50    READ (1,*,END=40)  TEMPS(J),QCOL(I,J),
      +                  BIDON(1),BIDON(2),BIDON(3),
      +                  BIDON(4),BIDON(5)
      QCOL(I,J)=QCOL(I,J)/1000.0
      CCOL(I,J)=BIDON(NPAR)
      IF (NPAR.LE.2) THEN
        CCOL(I,J)=CCOL(I,J)/1000.0

```

```

        ELSE
            CCOL(I,J)=CCOL(I,J)/1000000.0
        ENDIF
        J=J+1
        GOTO 50
40     CLOSE (1)
* Initialisation des debits dans les troncons
        DO 60 I=1,5
            DO 60 J=1,(LS+HP)
                QAMONT(I,J)=0.0
60     QAVAL(I,J)=0.0
* Fin du module
        RETURN
        END

```

SUBROUTINE PREDIT

```

*     Sous-programme de prediction des debits et des concentrations
*     dans les collecteurs.

*     Ce programme n'utilise actuellement aucun modele de prediction.
*     Les valeurs predites sont donc egales aux valeurs reelles
*     mesurees, telles que lues dans les fichiers de donnees des
*     collecteurs.

        INTEGER I,J,HP,LS,K
* i         numero du collecteur/troncon/regulateur
* j         numero du pas de temps
* hp        horizon de prediction
* ls        longueur de la simulation
* k         numero du pas de temps de simulation

        REAL QCOL(5,100),CCOL(5,100),QPRE(5,10),CPRE(5,10)
        REAL QREG(5,100),QDEV(5,100)
        REAL QAMONT(5,100),QAVAL(5,100),AAMONT(5,100),AAVAL(5,100)
        REAL CAMONT(5,100),CAVAL(5,100)
        REAL LONG(5),DIAM(5),PENDE(5)
        REAL TEMPS(100)
        REAL QMAX(5)
        REAL CMANN,ALPHA,BETA,DT
        REAL COEF1(5),COEF2(5),COEF3(5)
* qcol(i,j) debit reel au collecteur

```

```

* ccol(i,j)    concentration reelle au collecteur
* qpre(i,k)    debit predit au collecteur
* cpre(i,k)    concentration predite au collecteur
* qreg(i,j)    debit regule
* qdev(i,j)    debit deverse
* qamont(i,j)  debit amont dans l'intercepteur
* qaval(i,j)   debit aval dans l'intercepteur
* aamont(i,j)  aire amont dans l'intercepteur
* aaval(i,j)   aire aval dans l'intercepteur
* camont(i,j)  concentration amont dans l'intercepteur
* caval(i,j)   concentration aval dans l'intercepteur
* long(i)      longueur du troncon
* diam(i)      diametre du troncon
* pente(i)     pente du troncon
* temps(j)     temps en minutes
* qmax(i)      debit maximal des troncons
* cmann        coefficient de Manning
* alpha        coefficient
* beta         coefficient
* dt           longueur du pas de temps kt
* coef1(i)     coefficient alpha du modele
* coef2(i)     coefficient beta du modele

```

```

COMMON /ETAT/I,J,HP,LS,
+          QCOL,CCOL,QPRE,CPRE,QREG,QDEV,
+          QAMONT,QAVAL,AAMONT,AAVAL,CAMONT,CAVAL,
+          LONG,DIAM,PENTE,TEMPS,QMAX,
+          CMANN,ALPHA,BETA,DT

```

```

* Coefficients

```

```

DATA COEF1/76.648,89.6347,106.5005,87.458,106.533/
DATA COEF2/0.9277,1.6692,0.3739,-0.1171,0.8051/

```

```

* Transfert des valeurs mesurees dans les valeurs predites

```

```

DO 10 K=1,HP
  DO 10 I=1,5
    QPRE(I,K)=QCOL(I,J+K-1)
    IF (J.EQ.1) THEN
      CPRE(I,K)=COEF1(I)
    ELSE
      CPRE(I,K)=COEF1(I)*(QCOL(I,J+K-1)/QCOL(I,J+K-2))
      **COEF2(I)
    +
  ENDIF
10 CPRE(I,K)=AINT(CPRE(I,K)*10000.0)/10000.0

```

```

* Fin du module

```

```
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE OPTIM(SETPT)
```

```
* Sous-programme qui organise la recherche du plan d'action optimal.
* Il donne des valeurs initiales aux parametres a optimiser, puis
* utilise le sous-programme d'optimisation POWELL.
```

```
INTEGER I,J,HP,LS,K
```

```
* i      numero du collecteur/troncon/regulateur
* j      numero du pas de temps
* hp     horizon de prediction
* ls     longueur de la simulation
* k      numero du pas de temps de simulation
```

```
REAL QCOL(5,100),CCOL(5,100),QPRE(5,10),CPRE(5,10)
REAL QREG(5,100),QDEV(5,100)
REAL QAMONT(5,100),QAVAl(5,100),AAMONT(5,100),AAVAL(5,100)
REAL CAMONT(5,100),CAVAL(5,100)
REAL LONG(5),DIAM(5),PENTE(5)
REAL TEMPS(100)
REAL QMAX(5)
REAL CMANN,ALPHA,BETA,DT
REAL SETPT(5,10),MIN(5,100),MAX(5,100)
```

```
* qcol(i,j)  debit reel au collecteur
* ccol(i,j)  concentration reelle au collecteur
* qpre(i,k)  debit predit au collecteur
* cpre(i,k)  concentration predite au collecteur
* qreg(i,j)  debit regule
* qdev(i,j)  debit deverse
* qamont(i,j) debit amont dans l'intercepteur
* qaval(i,j) debit aval dans l'intercepteur
* aamont(i,j) aire amont dans l'intercepteur
* aaval(i,j)  aire aval dans l'intercepteur
* camont(i,j) concentration amont dans l'intercepteur
* caval(i,j)  concentration aval dans l'intercepteur
* long(i)    longueur du troncon
* diam(i)    diametre du troncon
* pente(i)   pente du troncon
* temps(j)   temps en minutes
* qmax(i)    debit maximal des troncons
* cmann      coefficient de Manning
* alpha      coefficient
```

```

* beta          coefficient
* dt            longueur du pas de temps kt
* setpt(i,k)   trajectoire de controle (plan d'action)
* min(i,k)     borne inferieure des parametres a optimiser
* max(i,k)     borne superieure des parametres a optimiser

```

```

COMMON /ETAT/I,J,HP,LS,
+      QCOL,CCOL,QPRE,CPRE,QREG,QDEV,
+      QAMONT,QAVAL,AAMONT,AAVAL,CAMONT,CAVAL,
+      LONG,DIAM,PENTE,TEMPS,QMAX,
+      CMANN,ALPHA,BETA,DT

```

```

* Valeurs initiales des parametres a optimiser (plan d'action
* detaille)

```

```

DO 10 K=1,HP
DO 10 I=1,5
SETPT(I,K)=QMAX(I)
MIN(I,K)=0
10 MAX(I,K)=QMAX(I)

```

```

* Optimisation

```

```

CALL POWELL((5*HP),SETPT,MIN,MAX,30,0.0000000001,0.0)

```

```

* Fin du module

```

```

RETURN
END

```

```

SUBROUTINE POWELL(NP,X,XMIN,XMAX,NMAX,EPSILON,FMIN)

```

```

* Optimisateur
* Methode de Powell (1964)
* Adaptation

```

```

* Ce sous-programme sert a trouver le minimum d'une fonction de
* plusieurs parametres. Le nombre maximum de parametres est de
* 100 et ils sont dans la variable X. Il fait appel a un sous-
* programme FONCT(F,X) qui evalue la fonction F avec les
* parametres specifies X.

```

```

INTEGER NP,NMAX,I,J,M
* np      nombre de parametres
* nmax    nombre maximum d'iterations
* n       nombre d'iterations
* i       numero des parametres

```

```

* j          numero des directions
* m          numero de la meilleure direction

      REAL X(100),XMIN(100),XMAX(100),EPSILON,FMIN,F0,F1,F2,F3,FM,FE
      REAL DELTA,D1,D2,EXTERN
* x(i)      coordonnees externes
* xmin(i)   bornes inferieures des parametres
* xmax(i)   bornes superieures des parametres
* epsilon   critere de convergence
* fmin      minimum de la fonction objective
* f0        valeur de F au debut de l'iteration
* f1        valeur de F au point #1
* f2        valeur de F au point #2
* f3        valeur de F au point #3
* fm        valeur de F au point extrapole
* fe        valeur de F en fin d'iteration
* delta     decroissance de F dans la meilleure direction
* d1        critere de remplacement de la meilleure direction
* d2        critere de remplacement de la meilleure direction
* extern(z) fonction de conversion de coordonnee interne a externe

      DOUBLE PRECISION DIR(100,100),NDIR(100)
      DOUBLE PRECISION Y(100),Y0(100),YM(100),YE(100)
      DOUBLE PRECISION Z,X1,X2,X3,XM,D,C
* dir(j,i)  directions de recherche en coordonnees internes
* ndir(i)   nouvelle direction conjuguee
* y(i)      coordonnees internes du point a l'essai
* y0(i)     coordonnees internes du point de depart de l'iteration
* ym(i)     coordonnees internes du point intermediaire
* ye(i)     coordonnees internes du point extrapole de l'iteration
* z         argument de la fonction de conversion
* x1        coordonnees lineaires du point #1
* x2        coordonnees lineaires du point #2
* x3        coordonnees lineaires du point #3
* xm        coordonnees lineaires du point extrapole
* d         critere de courbure de la parabole
* c         critere de convergence

*          Fonction de conversion
      EXTERN(Z)=XMIN(I)+(XMAX(I)-XMIN(I))*SINGL(DSIN(Z)*DSIN(Z))

*          Valeurs initiales des parametres
      DO 10 I=1,NP
          YO(I)=ASIN(SQRT(DBLE((X(I)-XMIN(I))/(XMAX(I)-XMIN(I))))))
10      YM(I)=YO(I)
      CALL FONCT(F0,X)
      FM=F0

```

```

*      Directions initiales
DO 20 J=1,NP
  DO 20 I=1,NP
    IF (I.EQ.J) THEN
      DIR(J,I)=1.0
    ELSE
      DIR(J,I)=0.0
    ENDIF
20  CONTINUE

*      Debut d'iteration
N=0
100 F0=FM
DELTA=0.0
M=1
WRITE(2,*) '      ITERATION=',N,' F=',FM

*      Recherches dans chacune des directions
DO 30 J=1,NP

*      Point #1
X1=0.0
F1=FM

*      Point #2
X2=1.0
DO 40 I=1,NP
  Y(I)=YM(I)+X2*DIR(J,I)
  X(I)=EXTERN(Y(I))
40  CALL FONCT(F2,X)

*      Point #3
IF (F1.GE.F2) THEN
  X3=2.0
ELSE
  X3=-1.0
ENDIF
DO 50 I=1,NP
  Y(I)=YM(I)+X3*DIR(J,I)
  X(I)=EXTERN(Y(I))
50  CALL FONCT(F3,X)

*      Point extrapole (minimum de la parabole)
D=((X2-X3)*F1+(X3-X1)*F2+(X1-X2)*F3)/((X1-X2)*(X2-X3)*(X3-X1))
IF (D.GE.0.0) THEN
  XM=2*X3-X1
ELSE
  XM=0.5*((X2*X2-X3*X3)*F1+(X3*X3-X1*X1)*F2+(X1*X1-X2*X2)*F3)/

```

```

+      ((X2-X3)*F1+(X3-X1)*F2+(X1-X2)*F3)
  ENDIF
  DO 60 I=1,NP
    Y(I)=YM(I)+XM*DIR(J,I)
60    X(I)=EXTERN(Y(I))
    CALL FONCT(FM,X)

*      On retient le meilleur point (parmi les 4 points)
  IF (F1.LE.FM) THEN
    FM=F1
    XM=X1
  ENDIF
  IF (F2.LT.FM) THEN
    FM=F2
    XM=X2
  ENDIF
  IF (F3.LT.FM) THEN
    FM=F3
    XM=X3
  ENDIF
70  DO 70 I=1,NP
    YM(I)=YM(I)+XM*DIR(J,I)

*      On trouve la meilleure direction
  IF ((F1-FM).GT.DELTA) THEN
    DELTA=F1-FM
    M=J
  ENDIF
30  CONTINUE

*      Calcul de la direction conjuguee
  DO 80 I=1,NP
    NDIR(I)=YM(I)-Y0(I)
80    Y(I)=YM(I)+NDIR(I)
    X(I)=EXTERN(Y(I))
    CALL FONCT(FE,X)

*      Recherche supplementaire selon la direction conjuguee
  X1=0.0
  F1=F0
  X2=1.0
  F2=FM
  X3=2.0
  F3=FE

*      Point extrapole (minimum de la parabole)
  D=((X2-X3)*F1+(X3-X1)*F2+(X1-X2)*F3)/((X1-X2)*(X2-X3)*(X3-X1))
  IF (D.GE.0.0) THEN

```

```

      XM=2*X3-X1
    ELSE
      XM=0.5*((X2*X2-X3*X3)*F1+(X3*X3-X1*X1)*F2+(X1*X1-X2*X2)*F3)/
+      ((X2-X3)*F1+(X3-X1)*F2+(X1-X2)*F3)
    ENDIF
    DO 82 I=1,NP
      Y(I)=Y0(I)+XM*NDIR(I)
82     X(I)=EXTERN(Y(I))
      CALL FONCT(FM,X)

*   On retient le meilleur point (parmi les 4 points)
      IF (F1.LT.FM) THEN
        FM=F1
        XM=X1
      ENDIF
      IF (F2.LT.FM) THEN
        FM=F2
        XM=X2
      ENDIF
      IF (F3.LT.FM) THEN
        FM=F3
        XM=X3
      ENDIF
      DO 84 I=1,NP
        YM(I)=Y0(I)+XM*NDIR(I)
84     Y0(I)=YM(I)

*   Remplacement de la meilleure direction
      D1=(F1-2.0*F2+F3)*(F1-F2-DELTA)**2
      D2=0.5*DELTA*(F1-F3)**2
      IF (F3.LT.F1.AND.D1.LT.D2) THEN
        DO 90 I=1,NP
          DIR(M,I)=DIR(1,I)*2.0
90     DIR(1,I)=NDIR(I)*2.0
        ENDIF

*   Fin d'iteration
      C=0.0
      DO 95 I=1,NP
        DO 95 J=1,NP
          DIR(J,I)=DIR(J,I)/2.0
95     C=C+DABS(DIR(J,I))
      N=N+1
      IF (C.GT.EPSILON.AND.FM.GT.FMIN.AND.N.LT.NMAX) GOTO 100

*   Resultats
      DO 110 I=1,NP
110     X(I)=EXTERN(YM(I))

```

```
WRITE (*,*) FM
RETURN
END
```

SUBROUTINE FONCT(F,X)

```
* Sous-programme qui simule le controle resultant du plan d'action
* propose par l'optimisateur et qui evalue la performance de ce
* plan d'action.
```

```
REAL F,X(100)
```

```
* f      fonction objectif
* x      valeurs des parametres
```

```
* Simulation
  CALL SIMUL(X)
```

```
* Evaluation
  CALL EVAL(F)
*   WRITE(*,*) F
```

```
* Fin du module
  RETURN
  END
```

SUBROUTINE EVAL(F)

```
* Sous-programme qui evalue la fonction objectif quantifiant
* la performance du plan d'action a l'essai.
```

```
INTEGER I,J,HP,LS,K,S
```

```
* i      numero du collecteur/troncon/regulateur
* j      numero du pas de temps
* hp     horizon de prediction
* ls     longueur de la simulation
* k      numero du pas de temps de simulation (relatif)
* s      numero du pas de temps de simulation (absolu)
```

```
REAL QCOL(5,100),CCOL(5,100),QPRE(5,10),CPRE(5,10)
```

```

REAL QREG(5,100),QDEV(5,100)
REAL QAMONT(5,100),QAVAl(5,100),AAMONT(5,100),AAVAL(5,100)
REAL CAMONT(5,100),CAVAL(5,100)
REAL LONG(5),DIAM(5),PENTE(5)
REAL TEMPS(100)
REAL QMAX(5)
REAL CMANN,ALPHA,BETA,DT
REAL F
* qcol(i,j)    debit reel au collecteur
* ccol(i,j)    concentration reelle au collecteur
* qpre(i,k)    debit predit au collecteur
* cpre(i,k)    concentration predite au collecteur
* qreg(i,j)    debit regule
* qdev(i,j)    debit deverse
* qamont(i,j)  debit amont dans l'intercepteur
* qaval(i,j)   debit aval dans l'intercepteur
* aamont(i,j)  aire amont dans l'intercepteur
* aaval(i,j)   aire aval dans l'intercepteur
* camont(i,j)  concentration amont dans l'intercepteur
* cavAl(i,j)   concentration aval dans l'intercepteur
* long(i)      longueur du troncon
* diam(i)      diametre du troncon
* pente(i)     pente du troncon
* temps(j)     temps en minutes
* qmax(i)      debit maximal des troncons
* cmann        coefficient de Manning
* alpha        coefficient
* beta         coefficient
* dt           longueur du pas de temps kt
* f            fonction objectif

COMMON /ETAT/I,J,HP,LS,
+           QCOL,CCOL,QPRE,CPRE,QREG,QDEV,
+           QAMONT,QAVAl,AAMONT,AAVAL,CAMONT,CAVAL,
+           LONG,DIAM,PENTE,TEMPS,QMAX,
+           CMANN,ALPHA,BETA,DT

* Calcul de la fonction objectif
  F=0.0
  DO 10 I=1,5
    DO 10 K=1,HP
      S=J+K-1
10      F=F+QDEV(I,S)*CPRE(I,K)

* Fin du module
  RETURN
  END

```

SUBROUTINE APPLIQ(SETPT)

* Sous-programme qui applique le plan d'action optimal determine
* par l'optimisateur. Cette application est effectuee pour un
* seul pas de temps et utilise les valeurs reelles mesurees,
* et non les valeurs predites.

INTEGER I,J,HP,LS,K
* i numero du collecteur/troncon/regulateur
* j numero du pas de temps
* hp horizon de prediction
* ls longueur de la simulation
* k numero du pas de temps de simulation

REAL QCOL(5,100),CCOL(5,100),QPRE(5,10),CPRE(5,10)
REAL QREG(5,100),QDEV(5,100)
REAL QAMONT(5,100),QAVAl(5,100),AAMONT(5,100),AAVAL(5,100)
REAL CAMONT(5,100),CAVAL(5,100)
REAL LONG(5),DIAM(5),PENTE(5)
REAL TEMPS(100)
REAL QMAX(5)
REAL CMANN,ALPHA,BETA,DT
REAL SETPT(5,10)
* qcol(i,j) debit reel au collecteur
* ccol(i,j) concentration reelle au collecteur
* qpre(i,k) debit predit au collecteur
* cpre(i,k) concentration predite au collecteur
* qreg(i,j) debit regule
* qdev(i,j) debit deverse
* qamont(i,j) debit amont dans l'intercepteur
* qaval(i,j) debit aval dans l'intercepteur
* aamont(i,j) aire amont dans l'intercepteur
* aaval(i,j) aire aval dans l'intercepteur
* camont(i,j) concentration amont dans l'intercepteur
* caval(i,j) concentration aval dans l'intercepteur
* long(i) longueur du troncon
* diam(i) diametre du troncon
* pente(i) pente du troncon
* temps(j) temps en minutes
* qmax(i) debit maximal des troncons
* cmann coefficient de Manning
* alpha coefficient

```

* beta          coefficient
* dt            longueur du pas de temps kt
* setpt(i,k)   trajectoire de controle (plan d'action)

      COMMON /ETAT/I,J,HP,LS,
+          QCOL,CCOL,QPRE,CPRE,QREG,QDEV,
+          QAMONT,QAVAL,AAMONT,AAVAL,CAMONT,CAVAL,
+          LONG,DIAM,PENTE,TEMPS,QMAX,
+          CMANN,ALPHA,BETA,DT

* Transfert des valeurs mesurees dans les valeurs predites
  DO 10 K=1,HP
    DO 10 I=1,5
      QPRE(I,K)=QCOL(I,J+K-1)
10     CPRE(I,K)=CCOL(I,J+K-1)

* Simulation reelle avec les valeurs reelles mesurees
  CALL SIMUL(SETPT)

* Fin du module
  RETURN
  END

```

SUBROUTINE SIMUL(SETPT)

```

* Sous-programme qui simule le comportement d'un reseau unitaire
* comprenant 5 regulateurs en serie qui peuvent etre controles
* de facon integree.

  INTEGER I,J,HP,LS,K,S

* i          numero du collecteur/troncon/regulateur
* j          numero du pas de temps
* hp         horizon de prediction
* ls        longueur de la simulation
* k          numero du pas de temps de simulation (relatif)
* s          numero du pas de temps de simulation (absolu)

  REAL QCOL(5,100),CCOL(5,100),QPRE(5,10),CPRE(5,10)
  REAL QREG(5,100),QDEV(5,100)
  REAL QAMONT(5,100),QAVAL(5,100),AAMONT(5,100),AAVAL(5,100)
  REAL CAMONT(5,100),CAVAL(5,100)
  REAL LONG(5),DIAM(5),PENTE(5)
  REAL TEMPS(100)
  REAL QMAX(5)

```

```

      REAL CMANN,ALPHA,BETA,DT
      REAL SETPT(5,10)
      REAL A,B,C,D
* qcol(i,j)    debit reel au collecteur
* ccol(i,j)    concentration reelle au collecteur
* qpre(i,k)    debit predict au collecteur
* cpre(i,k)    concentration predite au collecteur
* qreg(i,j)    debit regule
* qdev(i,j)    debit deverse
* qamont(i,j)  debit amont dans l'intercepteur
* qaval(i,j)   debit aval dans l'intercepteur
* aamont(i,j)  aire amont dans l'intercepteur
* aaval(i,j)   aire aval dans l'intercepteur
* camont(i,j)  concentration amont dans l'intercepteur
* cavali(i,j)  concentration aval dans l'intercepteur
* long(i)      longueur du troncon
* diam(i)      diametre du troncon
* pente(i)     pente du troncon
* temps(j)     temps en minutes
* qmax(i)      debit maximal des troncons
* cmann        coefficient de Manning
* alpha        coefficient
* beta         coefficient
* dt           longueur du pas de temps kt
* setpt(i,k)   trajectoire de controle (plan d'action)
* a            variable intermediaire
* b            variable intermediaire
* c            variable intermediaire
* d            variable accessoire

      COMMON /ETAT/I,J,HP,LS,
+           QCOL,CCOL,QPRE,CPRE,QREG,QDEV,
+           QAMONT,QAVAl,AAMONT,AAVAL,CAMONT,CAVAL,
+           LONG,DIAM,PENTE,TEMPS,QMAX,
+           CMANN,ALPHA,BETA,DT

* Pas de temps de la simulation
      DO 10 K=1,HP
          S=J+K-1
          DO 10 I=1,5

* Respect du bilan de masse au regulateur
* Plan d'action detaille
      IF (I.EQ.1) THEN
          QREG(I,S)=SETPT(I,K)-.3721
      ELSE
          QREG(I,S)=SETPT(I,K)-QAVAl(I-1,S)
      ENDIF

```

```

IF (QREG(I,S).LT.0.) QREG(I,S)=0.
IF (QREG(I,S).GT.QPRE(I,K)) QREG(I,S)=QPRE(I,K)
IF (I.EQ.1) THEN
  QAMONT(I,S)=.3721+QREG(I,S)
ELSE
  QAMONT(I,S)=QAVAI(I-1,S)+QREG(I,S)
ENDIF
QDEV(I,S)=QPRE(I,K)-QREG(I,S)

```

* Laminage des debits dans le troncon

```

A=QAMONT(I,S)
IF (S.EQ.1) THEN
  B=.3721**(1.0/BETA)
ELSE
  B=QAVAI(I,S-1)**(1.0/BETA)
ENDIF
C=LONG(I)*DIAM(I)**2.0/DT*(CMANN/ALPHA/DIAM(I)**(8.0/3.0)
+ /SQRT(PENTE(I)))**(1.0/BETA)

```

* Methode de Newton

```

20 QAVAI(I,S)=QAVAI(I,S)+0.0001
+ D=(A-QAVAI(I,S)-C*(QAVAI(I,S)**(1.0/BETA)-B))/
  (-1.-C/BETA*QAVAI(I,S)**(1.0/BETA)/QAVAI(I,S))
  QAVAI(I,S)=QAVAI(I,S)-D
  IF (QAVAI(I,S).LT.0.0) QAVAI(I,S)=-QAVAI(I,S)/2.0
  IF (ABS(D).GT.0.0001.AND.QAVAI(I,S).GT.0.0001) GOTO 20

```

* Calcul des aires

```

+ AAMONT(I,S)=DIAM(I)**2*(QAMONT(I,S)*CMANN/ALPHA/DIAM(I)
  ** (8.0/3.0)/SQRT(PENTE(I)))**(1.0/BETA)
+ AAVAI(I,S)=DIAM(I)**2*(QAVAI(I,S)*CMANN/ALPHA/DIAM(I)
  ** (8.0/3.0)/SQRT(PENTE(I)))**(1.0/BETA)

```

* Calcul des concentrations

```

IF (I.EQ.1) THEN
  CAMONT(I,S)=CPRE(I,K)*QREG(I,S)/QAMONT(I,S)
ELSE
+ CAMONT(I,S)=(CAVAL(I-1,S)*QAVAI(I-1,S)+CPRE(I,K)*
  QREG(I,S))/QAMONT(I,S)
  ENDIF
  IF (S.EQ.1) THEN
+ CAVAL(I,S)=(CAMONT(I,S)*QAMONT(I,S)*DT)/(AAVAL(I,S)*
  LONG(I)+QAVAI(I,S)*DT)
  ELSE
+ CAVAL(I,S)=(CAVAL(I,S-1)*AAVAL(I,S-1)*LONG(I)+
  CAMONT(I,S)*QAMONT(I,S)*DT)/(AAVAL(I,S)*
  LONG(I)+QAVAI(I,S)*DT)
+
+
  ENDIF

```

10 CONTINUE

* Fin du module
RETURN
END

SUBROUTINE IMPRIM(DEBUT,FIN)

* Sous-programme qui écrit le rapport de la simulation

INTEGER I,J,HP,LS

* i numero du collecteur/troncon/regulateur
* j numero du pas de temps
* hp horizon de prediction
* ls longueur de la simulation

REAL QCOL(5,100),CCOL(5,100),QPRE(5,10),CPRE(5,10)

REAL QREG(5,100),QDEV(5,100)

REAL QAMONT(5,100),QAVAl(5,100),AAMONT(5,100),AAVAL(5,100)

REAL CAMONT(5,100),CAVAL(5,100)

REAL LONG(5),DIAM(5),PENTE(5)

REAL TEMPS(100)

REAL QMAX(5)

REAL CMANN,ALPHA,BETA,DT

REAL COEF

REAL CHTO,VOTO,CHTOR(5),VOTOR(5)

* qcol(i,j) debit reel au collecteur
* ccol(i,j) concentration reelle au collecteur
* qpre(i,k) debit predit au collecteur
* cpre(i,k) concentration predite au collecteur
* qreg(i,j) debit regule
* qdev(i,j) debit deverse
* qamont(i,j) debit amont dans l'intercepteur
* qaval(i,j) debit aval dans l'intercepteur
* aamont(i,j) aire amont dans l'intercepteur
* aaval(i,j) aire aval dans l'intercepteur
* camont(i,j) concentration amont dans l'intercepteur
* caval(i,j) concentration aval dans l'intercepteur
* long(i) longueur du troncon
* diam(i) diametre du troncon
* pente(i) pente du troncon
* temps(j) temps en minutes
* qmax(i) debit maximal des troncons
* cmann coefficient de Manning

```

* alpha      coefficient
* beta       coefficient
* dt         longueur du pas de temps kt
* coef       coefficient de transformation des concentrations
* chto       charge totale deversee
* voto       volume total deverse
* chtor(i)   charge totale deversee a chaque regulateur
* votor(i)   volume total deverse a chaque regulateur

```

```

CHARACTER*80 TITRE1,TITRE2
CHARACTER*12 FICH(5),RESULT
CHARACTER*10 DEBUT,FIN
CHARACTER*4 PARAM,UNIT

```

```

* titre1     titre de la simulation
* titre2     sous-titre de la simulation
* fich(i)    noms des fichiers de donnee des collecteurs
* result     nom du fichier resultat
* debut      temps du debut de la simulation
* fin        temps de la fin de la simulation
* param      nom du parametre de controle
* unit       unites du parametre de controle

```

```

COMMON /INTER/TITRE1,TITRE2,FICH,PARAM,UNIT,RESULT
COMMON /ETAT/I,J,HP,LS,
+          QCOL,CCOL,QPRE,CPRE,QREG,QDEV,
+          QAMONT,QAVAL,AAMONT,AAVAL,CAMONT,CAVAL,
+          LONG,DIAM,PENTE,TEMPS,QMAX,
+          CMANN,ALPHA,BETA,DT

```

```

* Calcul des charges totales et des volumes totaux deverses

```

```

  CHTO=0.0
  VOTO=0.0
  DO 10 I=1,5
    CHTOR(I)=0.0
    VOTOR(I)=0.0
    DO 20 J=1,LS
      CHTOR(I)=CHTOR(I)+QDEV(I,J)*CCOL(I,J)
20    VOTOR(I)=VOTOR(I)+QDEV(I,J)
      CHTOR(I)=CHTOR(I)*DT
      VOTOR(I)=VOTOR(I)*DT
      CHTO=CHTO+CHTOR(I)
10    VOTO=VOTO+VOTOR(I)

```

```

* Determination du coefficient de transformation des concentrations

```

```

  IF (UNIT.EQ.'mg/L') COEF=1000.0
  IF (UNIT.EQ.'ug/L') COEF=1000000.0

```

```

* Impression du rapport

```

```

OPEN (1,FILE=RESULT,STATUS='NEW')
WRITE (1,'(25X,A22)') '=====
WRITE (1,'(25X,A22)') 'Resultat de simulation'
WRITE (1,'(25X,A22)') '  Programme PREDIC  '
WRITE (1,'(25X,A22)') '=====
WRITE (1,'(/)')
WRITE (1,'(1X,A80)') TITRE1
WRITE (1,'(1X,A80)') TITRE2
WRITE (1,'(1X,A21,A10)') 'Simulation debute a ',DEBUT
WRITE (1,'(1X,A21,A10)') 'Simulation termine a ',FIN
WRITE (1,'(/)')
WRITE (1,'(1X,A23,A4,2X,A4)') 'Parametre de controle: ',PARAM,UNIT
WRITE (1,'(1X,A23,I4,2X,A12)') 'Horizon de prediction: ',HP,
+
+ 'pas de temps'
WRITE (1,'(1X,A23,I4,2X,A12)') 'Duree de la simulation:',LS,
+
+ 'pas de temps'
WRITE (1,'(/)')
WRITE (1,'(A24,F9.4,1X,A4)') ' Charge totale deversee:',CHTO,'kg '
WRITE (1,'(A24,F9.2,1X,A4)') ' Volume total deverse: ',VOTO,'m3 '
WRITE (1,'(//)')

DO 30 I=1,5
  WRITE (1,'(//)')
  WRITE (1,'(1X,A13,I2)') 'REGULATEUR No',I
  WRITE (1,'(1X,A19,A12)') 'Fichier de donnees:',FICH(I)
  WRITE (1,'(/)')
  WRITE (1,'(30X,A27)') 'CARACTERISTIQUES DU TRONCON'
  WRITE (1,'(30X,A16,F6.0,1X,A2)') '  Diametre : ',
+
+ 'DIAM(I)*1000.0,'mm'
  WRITE (1,'(30X,A16,F6.1,1X,A1)') '  Longueur : ',
+
+ 'LONG(I),'m'
  WRITE (1,'(30X,A16,F6.5)') '  Pente : ',
+
+ 'PENTE(I)'
  WRITE (1,'(30X,A16,F6.1,1X,A3)') 'Debit maximal : ',
+
+ 'QMAX(I)*1000.0,'L/s'
  WRITE (1,'(/)')
  WRITE (1,'(1X,10(A7))') 'TEMPS ', ' Q ', ' Q ',
+
+ ' Q ',
+
+ ' [ ] ', ' [ ] ', ' [ ] ',
+
+ 'CHARGE '
  WRITE (1,'(1X,10(A7))') ' ', ' COLL ', ' REGUL ',
+
+ ' DEVER ', ' AMONT ', ' AVAL ',
+
+ ' COLL ', ' AMONT ', ' AVAL ',
+
+ ' DEVER '
  WRITE (1,'(1X,6(A7),3(A1,A4,A2),A8)')
+
+ ' (min) ', '(L/s) ', '(L/s) ',
+
+ ' (L/s) ', '(L/s) ', '(L/s) ',
+
+ ' (' ,UNIT,') ', ' (' ,UNIT,') ',

```


ANNEXE B

HYDROGRAMMES ET POLLUTOGRAMMES DE LA PLUIE ETUDIEE

Tableau B.1

Données mesurées à l'exutoire du bassin 2 pour la pluie du 22 juin 1982

TEMPS	Q*	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
0	72.6	82.0	706.0	128.0	23.0	240.0
5	86.5	74.3	725.3	138.7	228.7	413.3
10	100.5	66.7	744.7	149.3	434.3	586.7
15	114.4	59.0	764.0	160.0	640.0	760.0
20	473.0	88.0	431.0	308.0	230.0	568.0
25	666.6	243.0	413.0	214.0	290.0	530.0
30	734.8	191.0	225.0	120.0	197.0	386.0
35	860.2	158.0	132.0	80.0	167.0	340.0
40	915.2	114.0	51.0	70.0	154.0	540.0
45	843.7	124.0	160.0	67.5	145.0	653.0
50	772.2	134.0	269.0	65.0	136.0	766.0
55	630.3	114.0	161.5	58.0	118.5	516.0
60	488.4	94.0	54.0	51.0	101.0	266.0
65	445.5	82.8	56.7	49.5	93.0	252.7
70	402.6	71.7	59.3	48.0	85.0	239.3
75	359.7	60.5	62.0	46.5	77.0	226.0
80	316.8	49.3	64.7	45.0	69.0	212.7
85	273.9	38.2	67.3	43.5	61.0	199.3
90	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0
95	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0
100	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0
105	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0
110	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0
115	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0
120	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0
125	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0
130	231.0	27.0	70.0	42.0	53.0	186.0

Tableau B.2

**Données mesurées à l'exutoire du bassin 11 pour la pluie du
22 juin 1982**

TEMPS	Q	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
0	62.0	31.0	93.0	36.0	5.0	340.0
5	135.0	84.5	124.5	58.0	102.5	330.0
10	208.0	138.0	156.0	80.0	200.0	320.0
15	208.0	168.5	146.0	80.0	214.0	320.0
20	208.0	199.0	136.0	80.0	228.0	320.0
25	371.0	178.0	86.0	73.0	188.0	310.0
30	371.0	177.0	125.0	78.0	200.0	320.0
35	314.0	147.0	63.0	65.0	192.0	262.0
40	258.0	131.5	59.0	77.0	186.5	257.0
45	202.0	116.0	55.0	89.0	181.0	252.0
50	180.5	99.5	45.0	73.0	247.5	206.0
55	159.0	83.0	35.0	57.0	314.0	160.0
60	293.5	103.0	35.0	60.0	235.0	260.0
65	428.0	123.0	35.0	63.0	156.0	360.0
70	466.0	151.0	51.0	85.5	165.0	355.0
75	504.0	179.0	67.0	108.0	174.0	350.0
80	521.0	204.0	67.0	81.0	180.0	532.0
85	530.0	165.0	59.0	88.0	173.0	472.0
90	456.0	159.0	63.0	78.0	143.0	468.0
95	388.0	151.5	57.0	67.5	118.5	414.0
100	320.0	144.0	51.0	57.0	94.0	360.0
105	303.8	125.0	45.6	53.8	83.4	333.6
110	287.6	106.0	40.2	50.6	72.8	307.2
115	271.4	87.0	34.8	47.4	62.2	280.8
120	255.2	68.0	29.4	44.2	51.6	254.4
125	239.0	49.0	24.0	41.0	41.0	228.0
130	239.0	49.0	24.0	41.0	41.0	228.0

Tableau B.3

**Données mesurées à l'exutoire du bassin 12 pour la pluie du
22 juin 1982**

TEMPS	Q	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
0	71.0	333.0	274.0	124.0	368.0	720.0
5	580.5	310.5	243.0	319.5	266.0	598.0
10	1090.5	288.0	212.0	515.0	164.0	476.0
15	1051.0	200.0	153.0	70.0	243.0	626.0
20	939.0	162.0	119.5	66.5	222.0	543.0
25	827.0	124.0	86.0	63.0	201.0	460.0
30	704.0	112.0	103.5	59.5	179.0	434.0
35	581.0	100.0	121.0	56.0	157.0	408.0
40	666.0	101.0	51.0	53.0	142.0	520.0
45	637.7	95.3	58.7	51.7	136.7	464.0
50	609.3	89.7	66.3	50.3	131.3	408.0
55	581.0	84.0	74.0	49.0	126.0	352.0
60	745.0	72.0	51.0	57.0	160.0	382.0
65	935.0	119.0	74.0	48.0	170.0	332.0
70	950.5	111.5	70.3	47.0	155.5	324.0
75	966.0	104.0	66.5	46.0	141.0	316.0
80	981.5	96.5	62.8	45.0	126.5	308.0
85	997.0	89.0	59.0	44.0	112.0	300.0
90	717.0	79.0	35.0	73.0	104.0	292.0
95	660.0	75.0	47.0	34.0	90.0	360.0
100	569.5	65.5	47.0	37.0	75.5	310.0
105	479.0	56.0	47.0	40.0	61.0	260.0
110	444.4	53.8	48.2	39.2	58.2	261.2
115	409.8	51.6	49.4	38.4	55.4	262.4
120	375.2	49.4	50.6	37.6	52.6	263.6
125	340.6	47.2	51.8	36.8	49.8	264.8
130	306.0	45.0	53.0	36.0	47.0	266.0

Tableau B.4

**Données mesurées à l'exutoire du bassin 14 pour la pluie du
22 juin 1982**

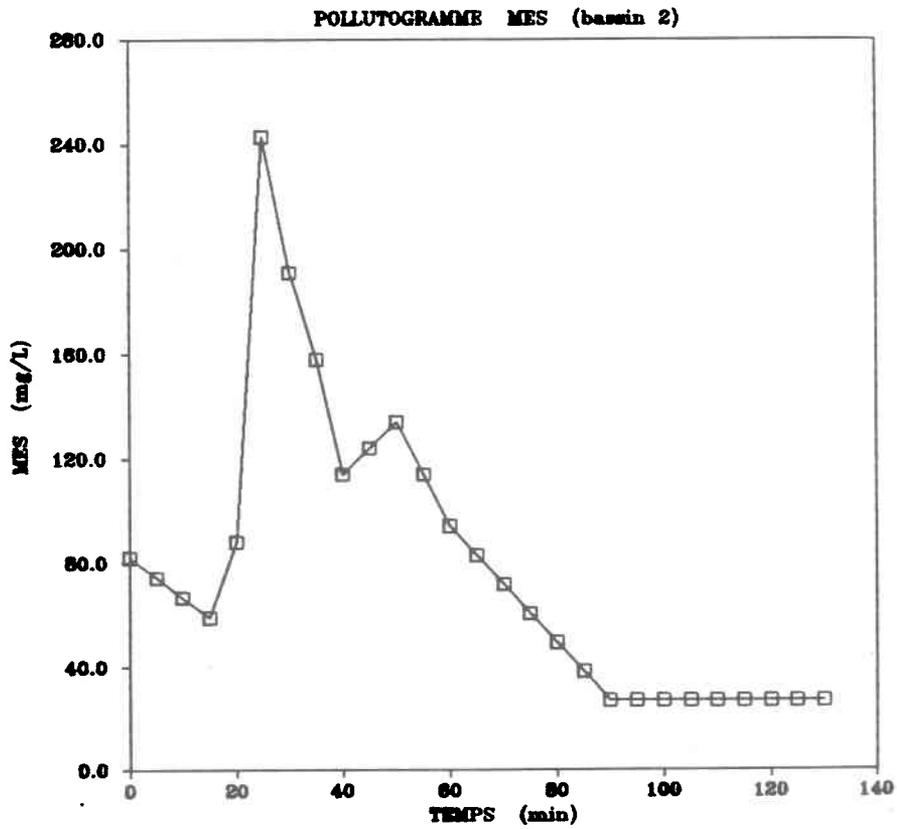
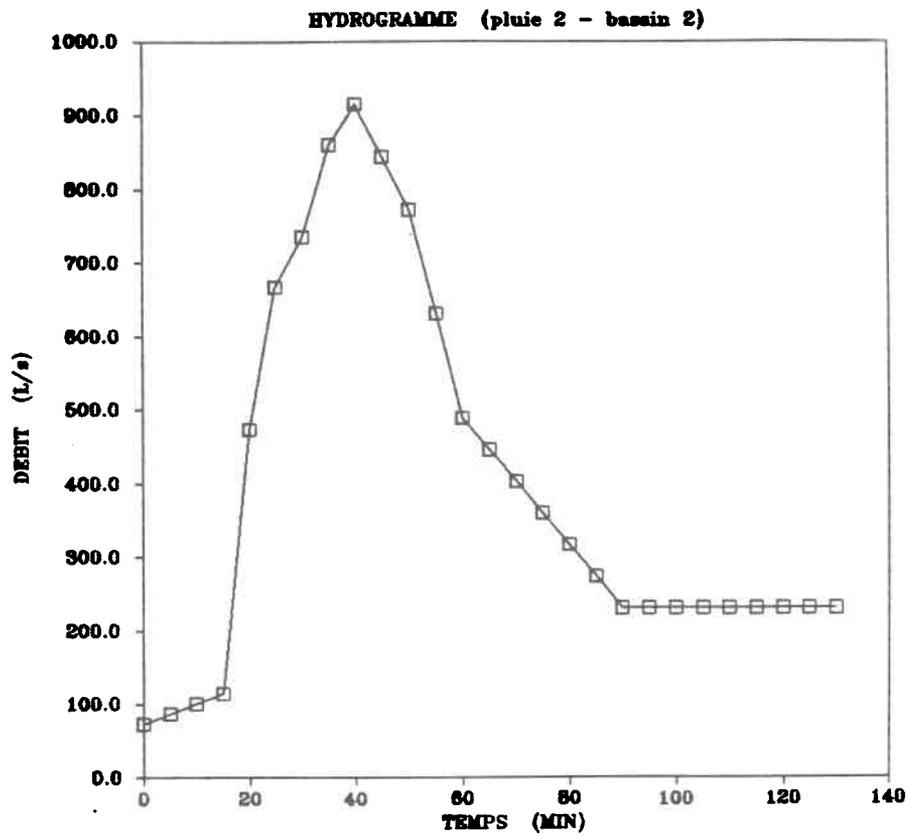
TEMPS	Q	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
0	55.0	71.0	290.0	49.0	54.0	310.0
5	116.0	176.0	408.0	85.0	136.0	500.0
10	195.0	468.0	792.0	86.0	244.0	648.0
15	167.0	322.5	517.5	81.0	262.0	546.0
20	139.0	177.0	243.0	76.0	280.0	444.0
25	187.0	234.0	180.0	95.0	286.0	840.0
30	194.5	186.5	189.5	82.0	244.0	670.0
35	202.0	139.0	199.0	69.0	202.0	500.0
40	230.0	113.0	109.0	61.0	172.0	520.0
45	231.0	110.7	109.0	62.0	169.3	493.3
50	232.0	108.3	109.0	63.0	166.7	466.7
55	233.0	106.0	109.0	64.0	164.0	440.0
60	162.0	84.0	86.0	52.0	150.0	364.0
65	203.0	82.0	78.0	48.0	172.0	376.0
70	228.0	81.5	73.3	46.3	163.5	364.5
75	253.0	81.0	68.5	44.5	155.0	353.0
80	278.0	80.5	63.8	42.8	146.5	341.5
85	303.0	80.0	59.0	41.0	138.0	330.0
90	453.0	97.0	78.0	47.0	167.0	600.0
95	549.0	105.0	35.0	49.0	183.0	438.0
100	596.0	117.5	64.5	50.5	186.5	429.0
105	643.0	130.0	94.0	52.0	190.0	420.0
110	643.0	130.0	94.0	52.0	190.0	420.0
115	643.0	130.0	94.0	52.0	190.0	420.0
120	643.0	130.0	94.0	52.0	190.0	420.0
125	643.0	130.0	94.0	52.0	190.0	420.0
130	643.0	130.0	94.0	52.0	190.0	420.0

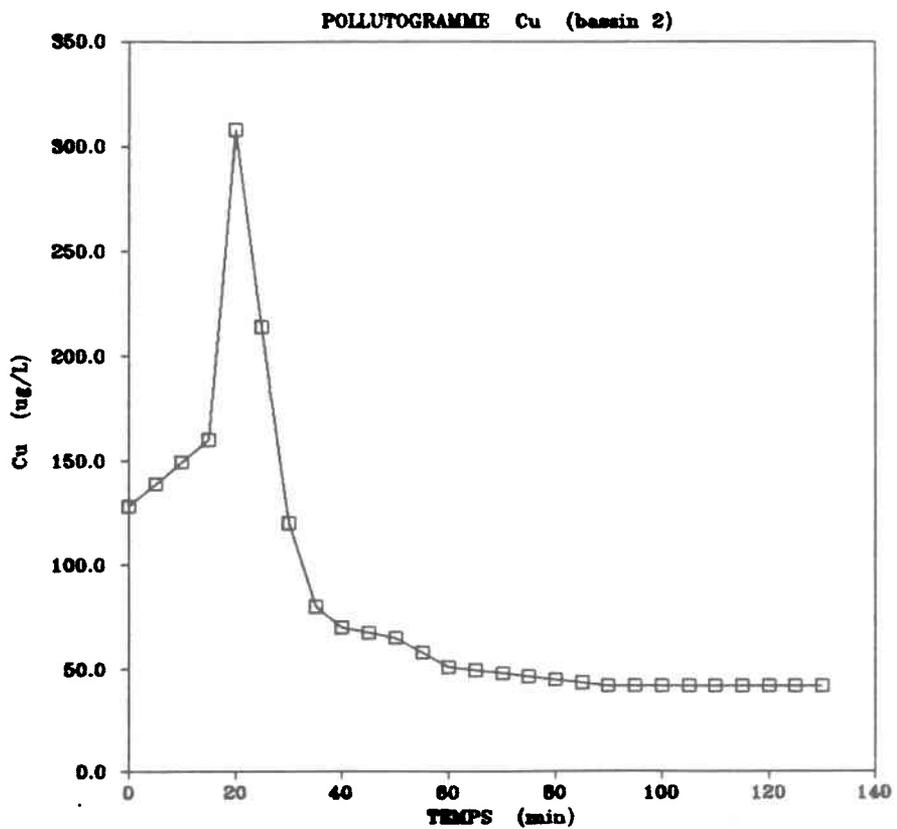
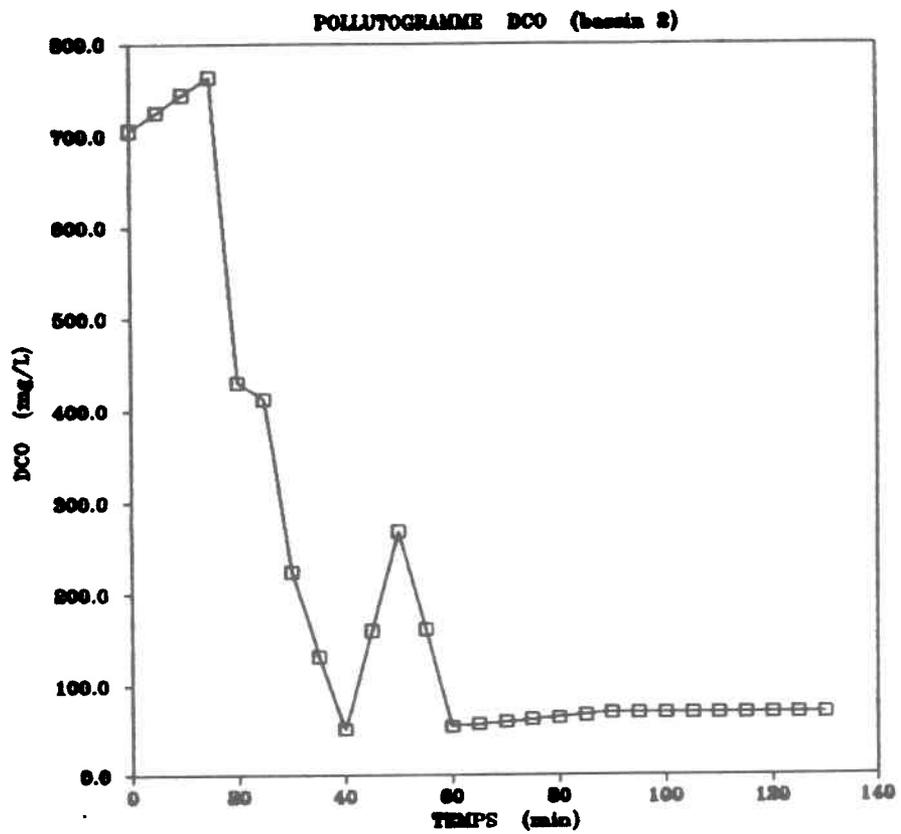
Tableau B.5

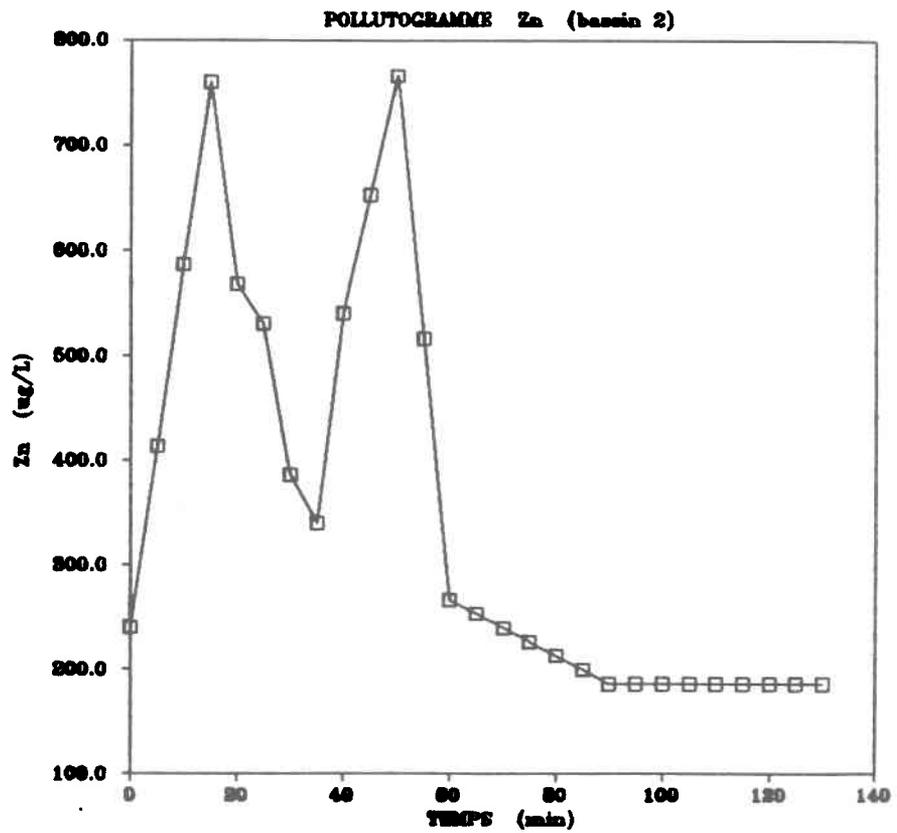
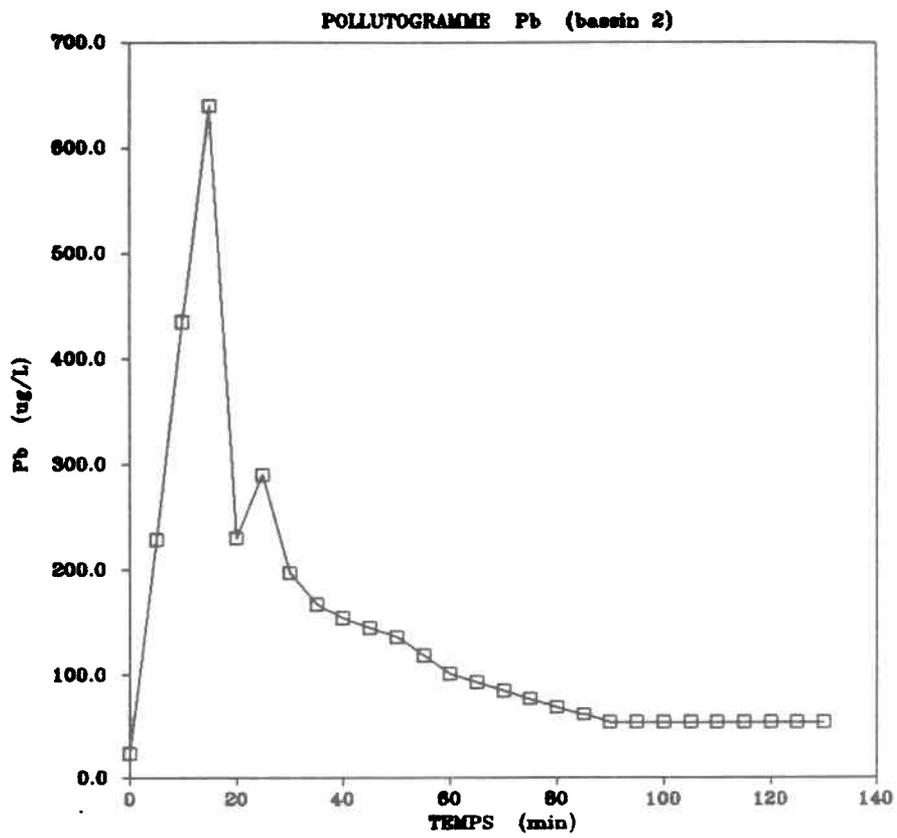
Données mesurées à l'exutoire du bassin 7 pour la pluie du 22 juin 1982

TEMPS	Q*	MES	DCO	Cu	Pb	Zn
0	92.4	96.0	528.0	68.0	20.0	184.0
5	103.1	98.7	503.7	73.0	35.0	199.3
10	113.6	101.3	479.3	78.0	50.0	214.7
15	124.3	104.0	455.0	83.0	65.0	230.0
20	234.3	952.0	2270.0	88.0	217.0	274.0
25	311.3	61.0	436.0	83.0	170.0	260.0
30	374.0	154.0	261.0	90.0	158.0	290.0
35	822.8	178.0	354.0	76.0	165.0	270.0
40	676.5	186.0	350.0	99.0	180.0	292.0
45	704.0	186.0	58.0	73.0	165.0	256.0
50	663.3	162.0	147.5	66.0	155.0	254.0
55	622.6	138.0	237.0	59.0	145.0	252.0
60	457.1	100.5	167.0	52.0	127.0	226.0
65	291.5	63.0	97.0	45.0	109.0	200.0
70	401.0	92.0	179.0	46.5	105.0	195.0
75	510.4	121.0	261.0	48.0	101.0	190.0
80	443.9	105.0	216.3	45.8	91.8	175.5
85	377.3	89.0	171.5	43.5	82.5	161.0
90	310.8	73.0	126.8	41.3	73.3	146.5
95	244.2	57.0	82.0	39.0	64.0	132.0
100	244.2	57.0	82.0	39.0	64.0	132.0
105	244.2	57.0	82.0	39.0	64.0	132.0
110	244.2	57.0	82.0	39.0	64.0	132.0
115	244.2	57.0	82.0	39.0	64.0	132.0
120	244.2	57.0	82.0	39.0	64.0	132.0
125	244.2	57.0	82.0	39.0	64.0	132.0
130	244.2	57.0	82.0	39.0	64.0	132.0

**Hydrogramme et pollutogrammes mesurés
à l'exutoire du bassin 2
pour la pluie du 22 juin 1982**

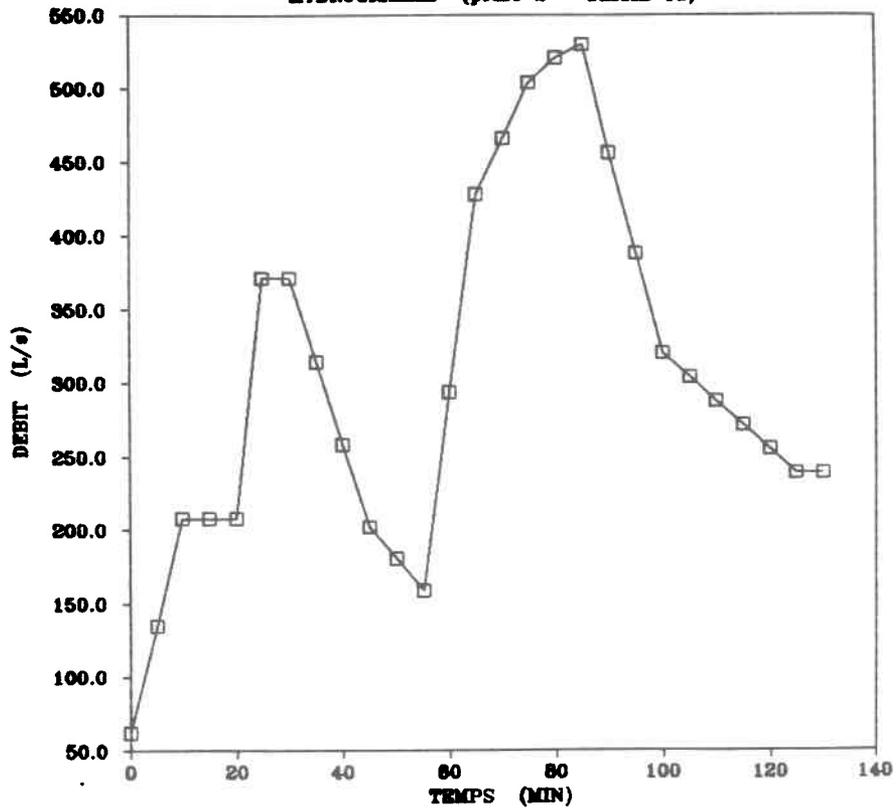




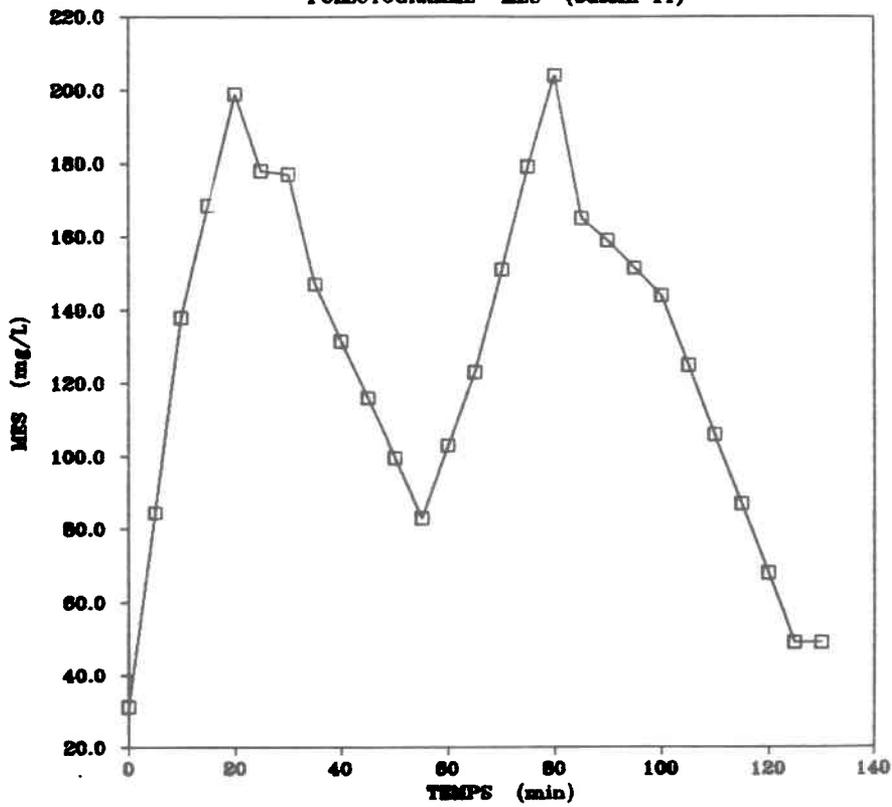


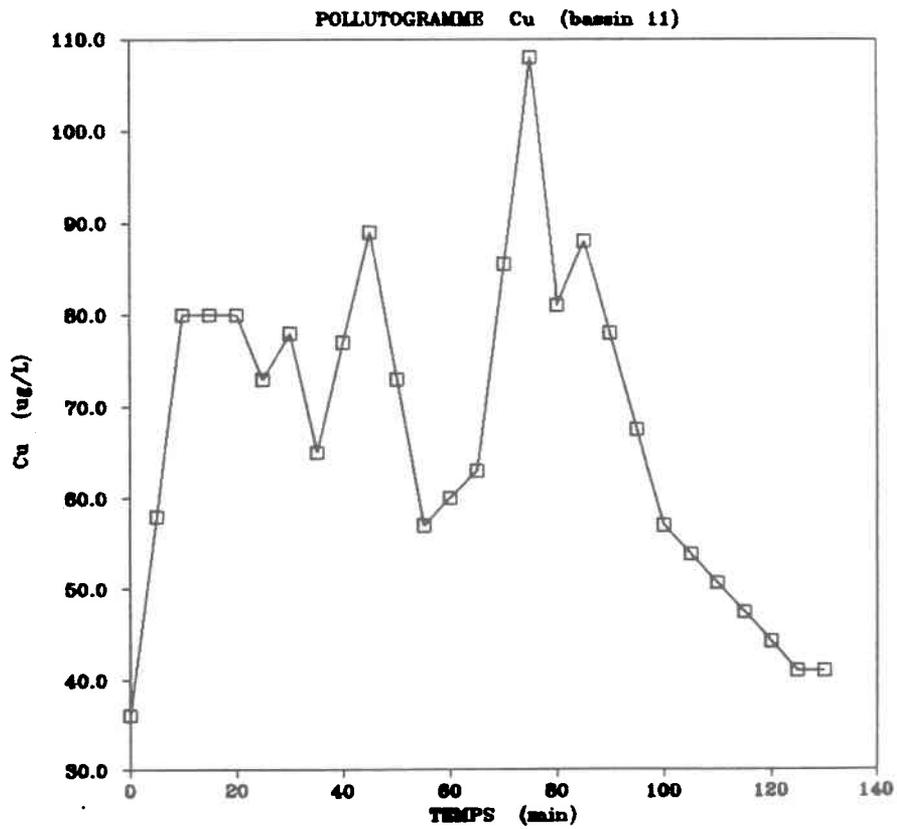
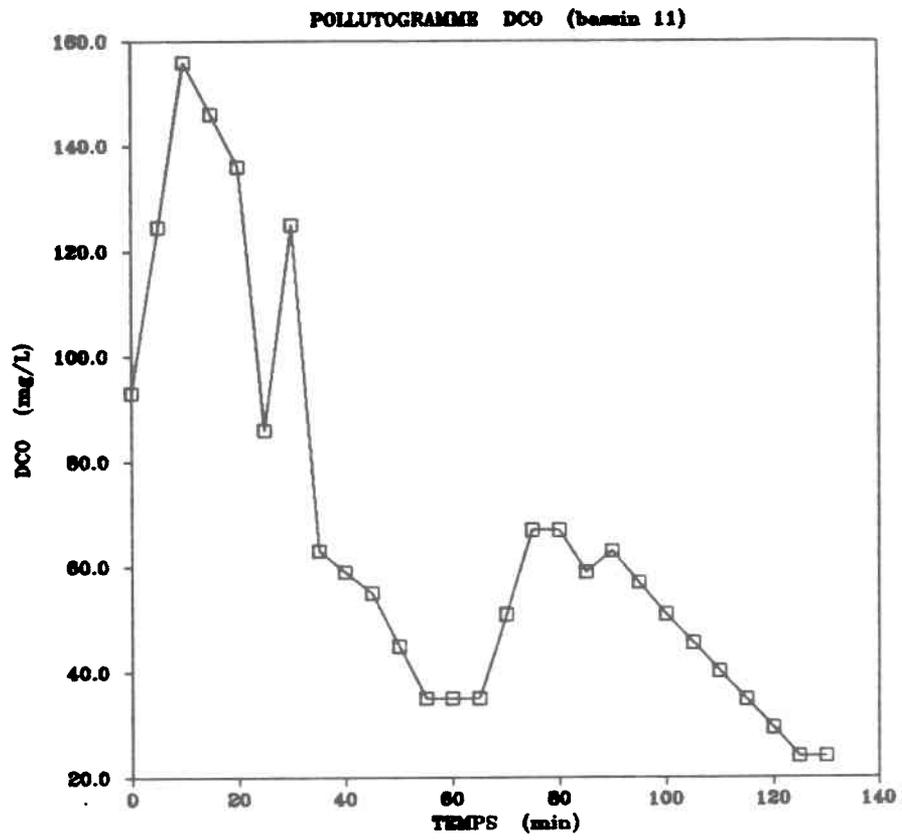
**Hydrogramme et pollutogrammes mesurés
à l'exutoire du bassin 11
pour la pluie du 22 juin 1982**

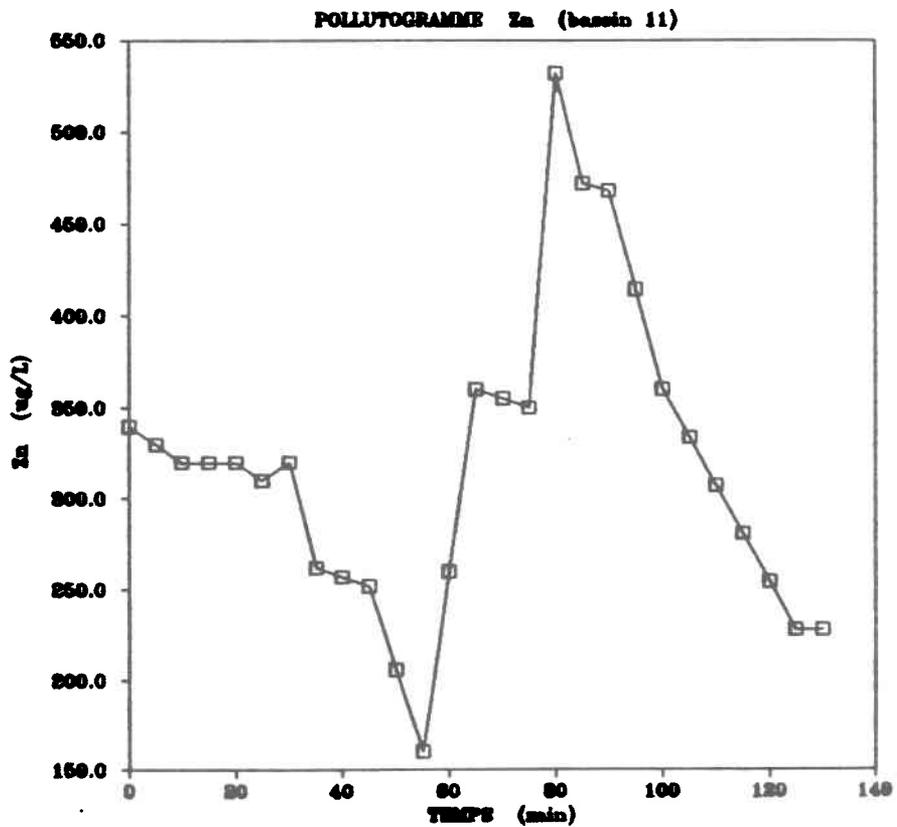
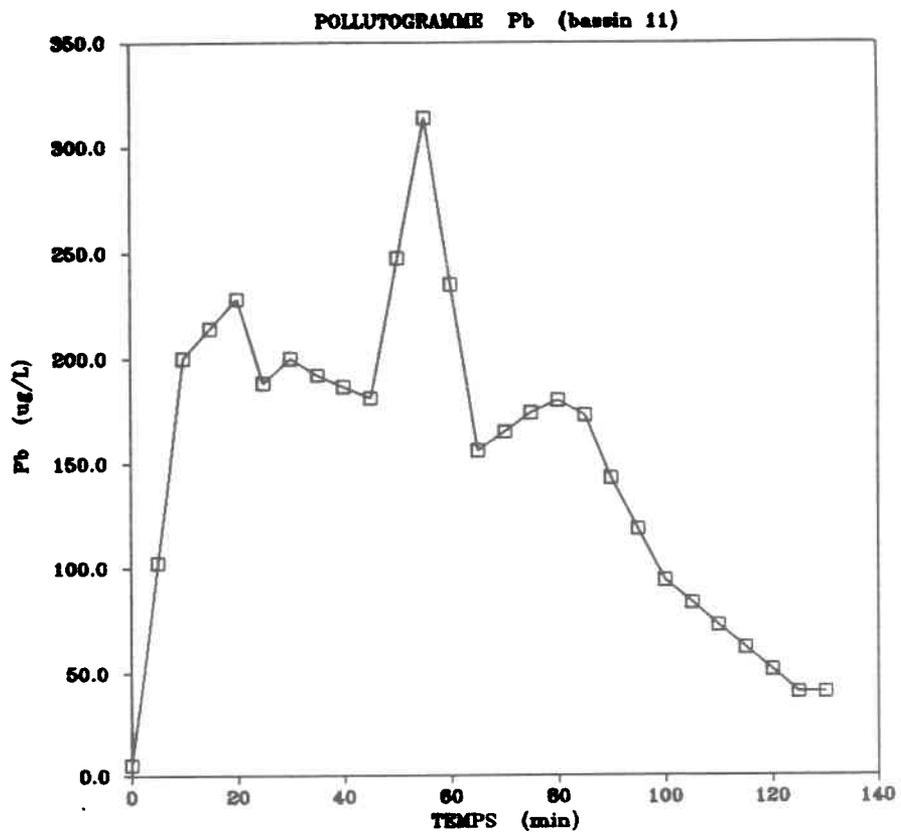
HYDROGRAMME (pluie 2 - bassin 11)



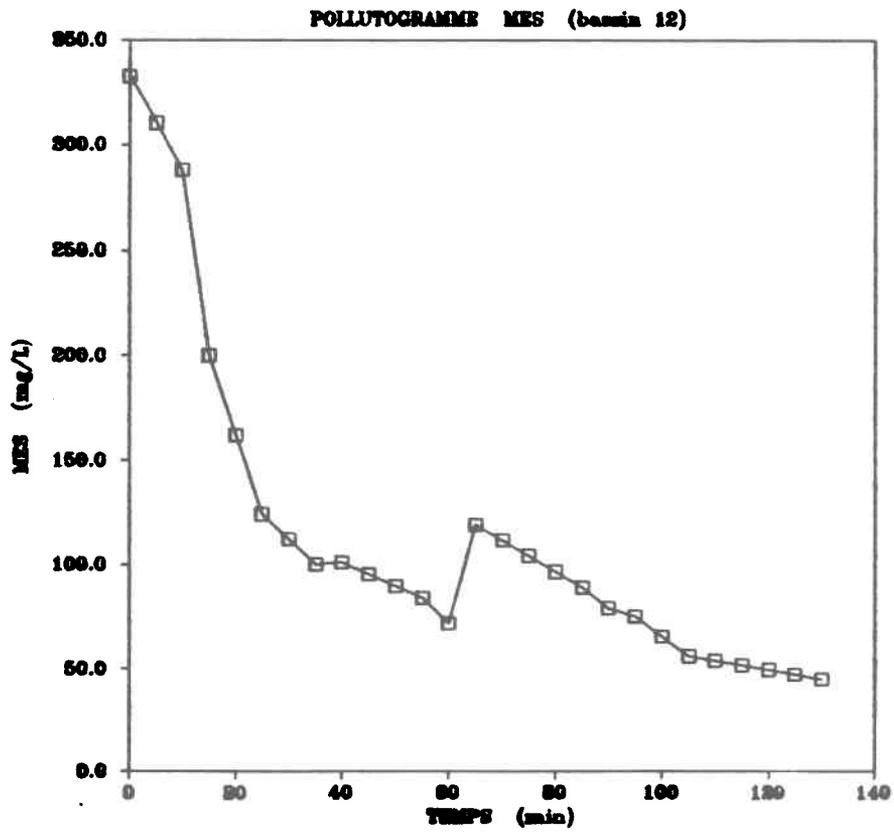
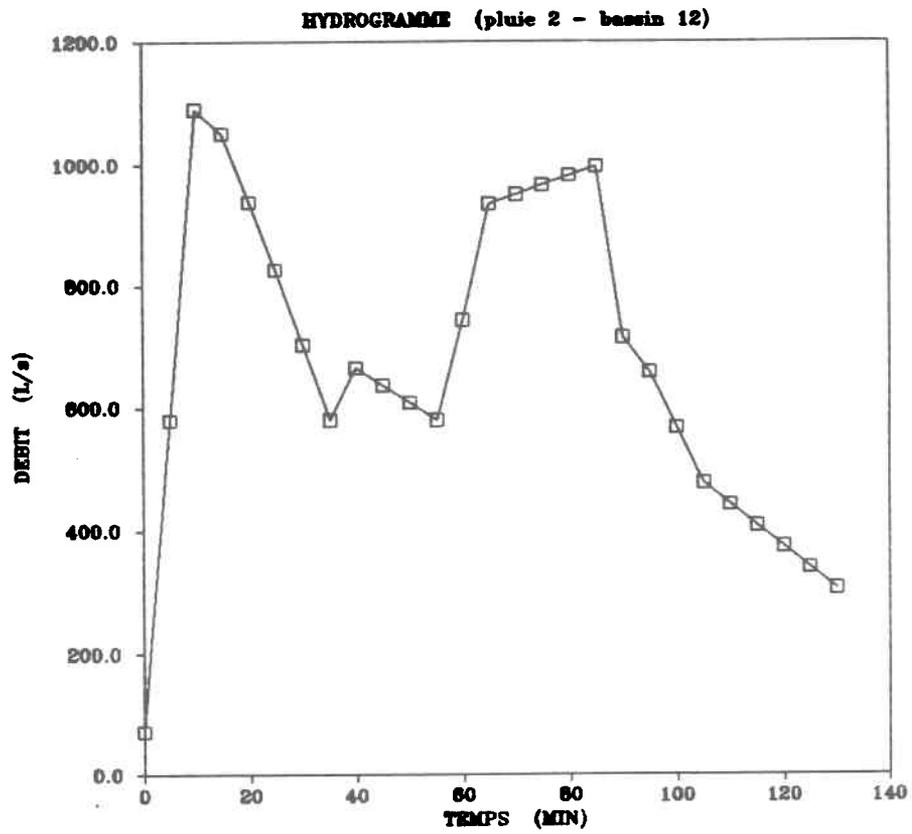
POLLUTOGRAMME MES (bassin 11)

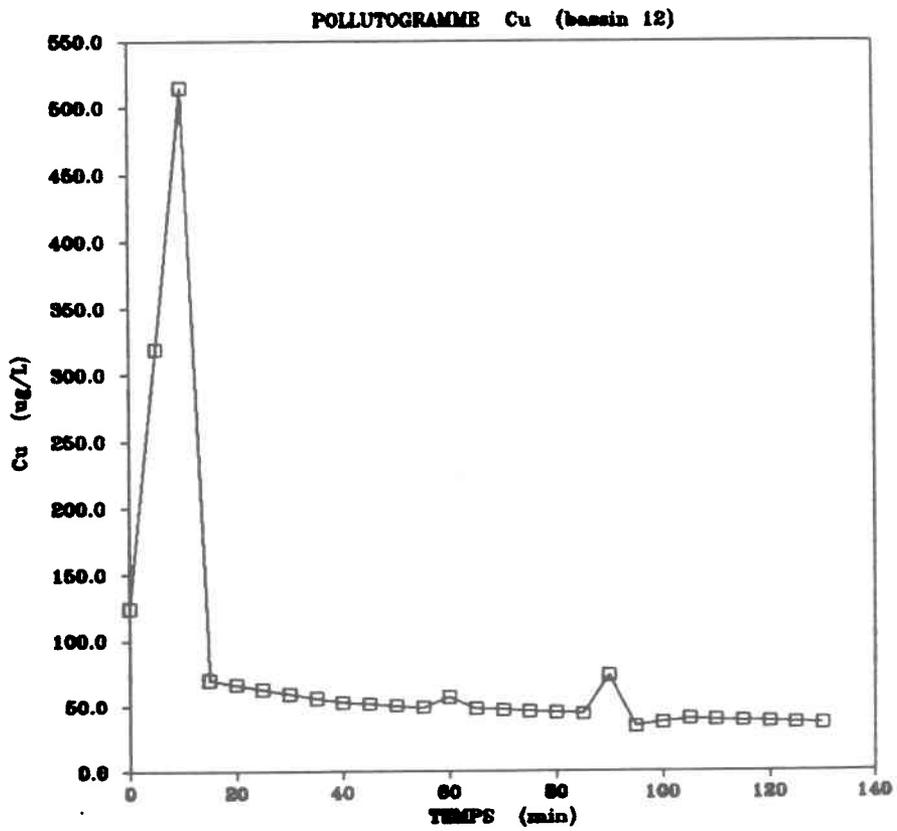
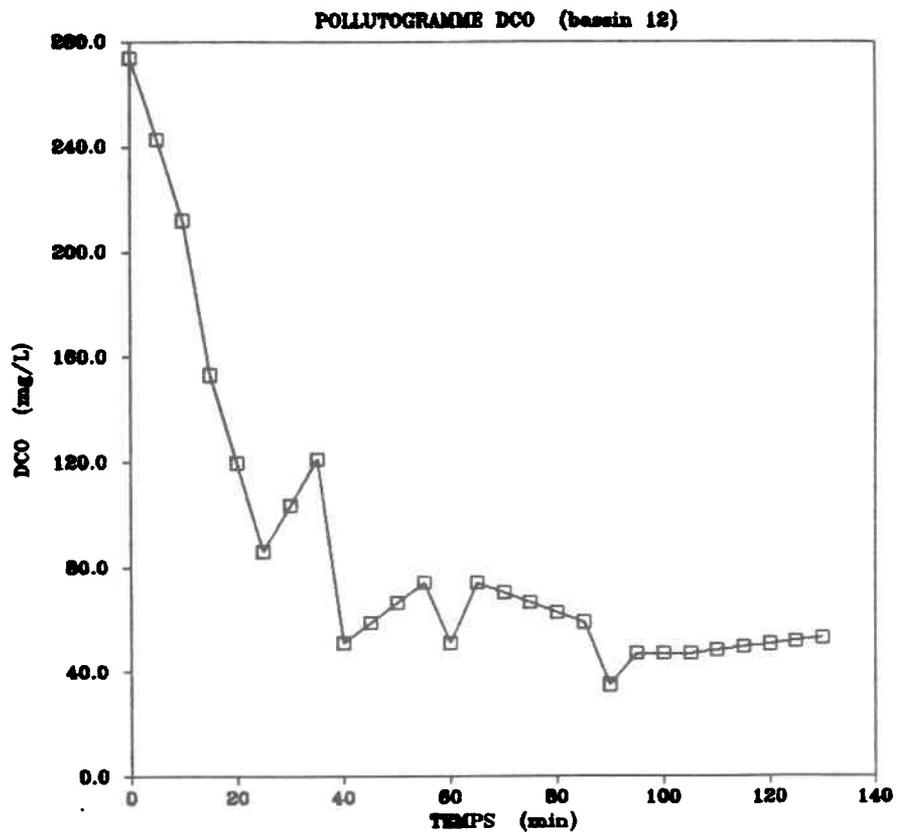


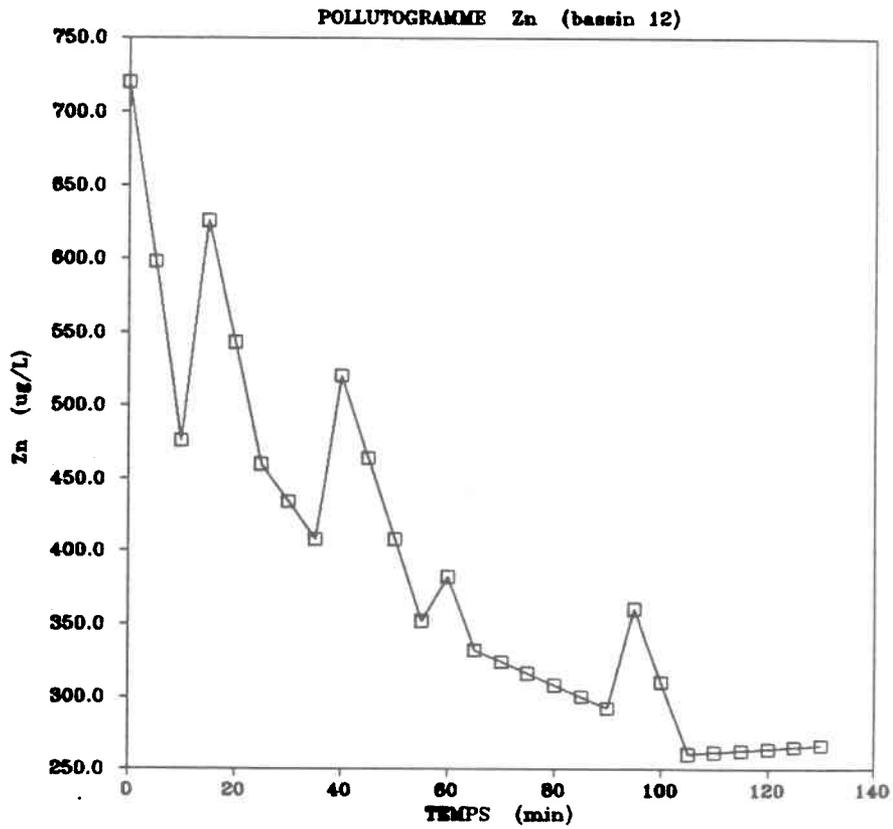
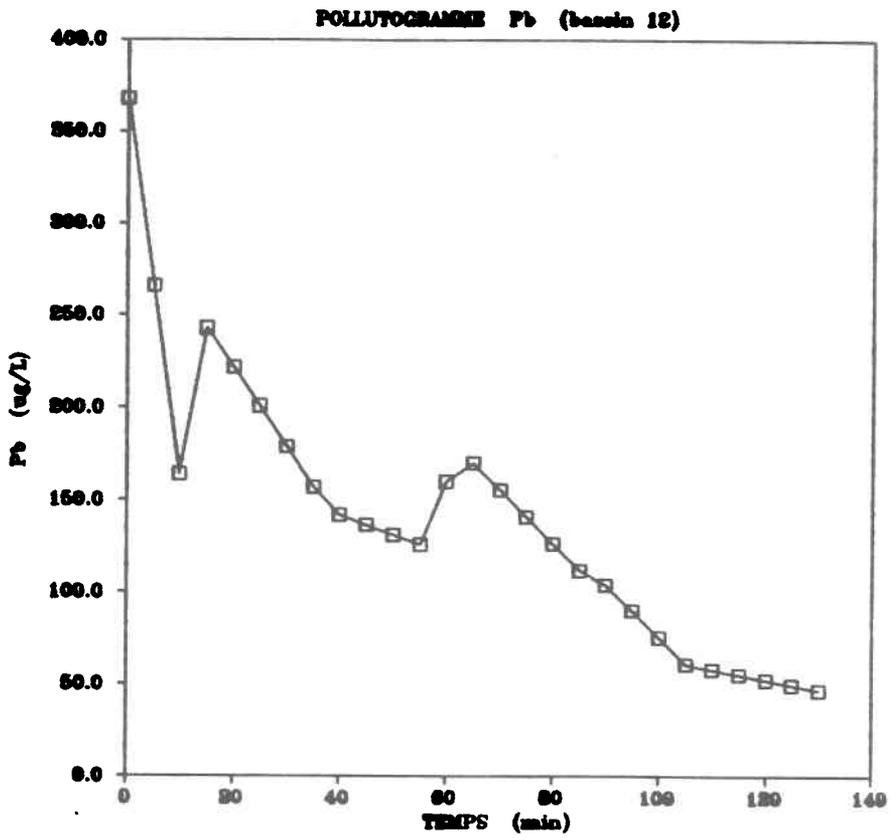




**Hydrogramme et pollutogrammes mesurés
à l'exutoire du bassin 12
pour la pluie du 22 juin 1982**

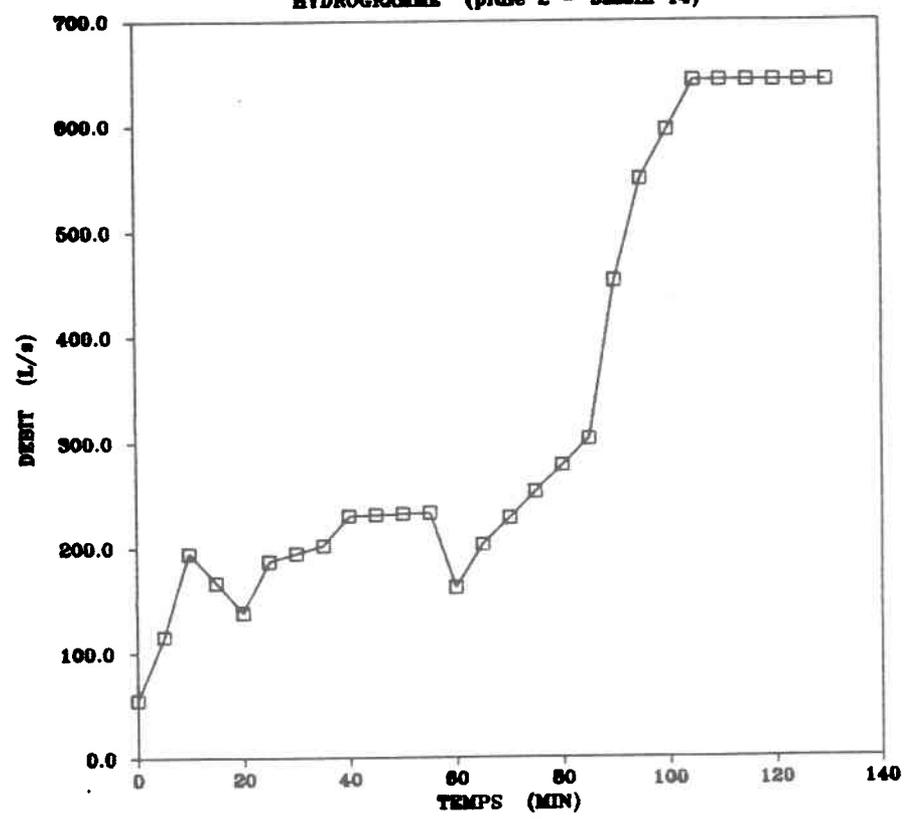




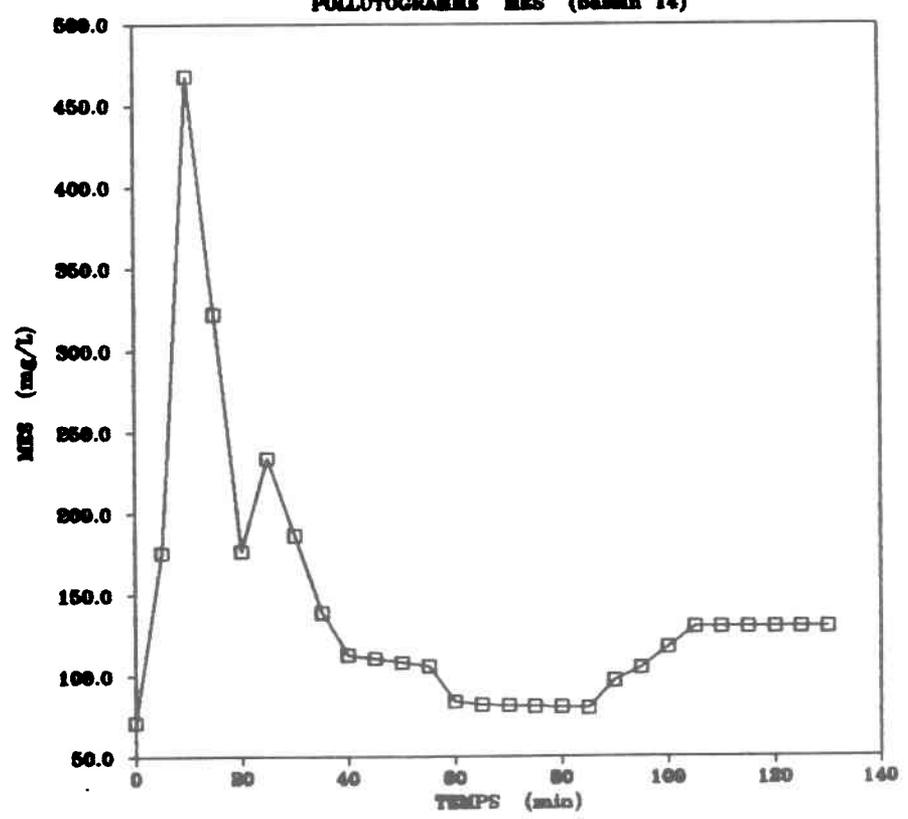


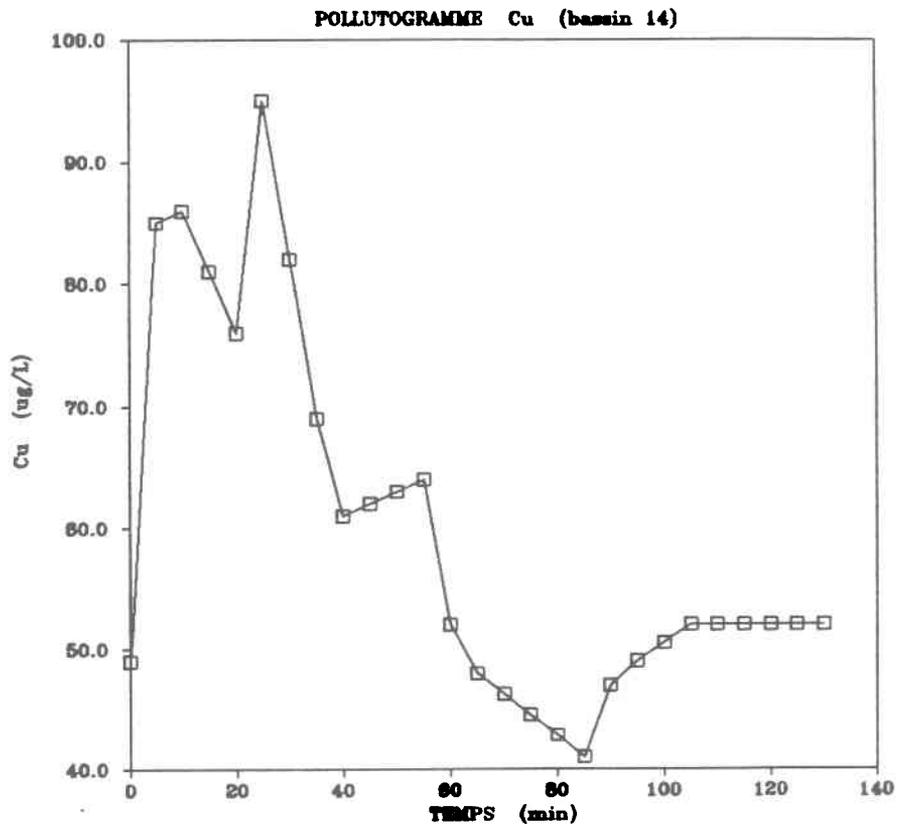
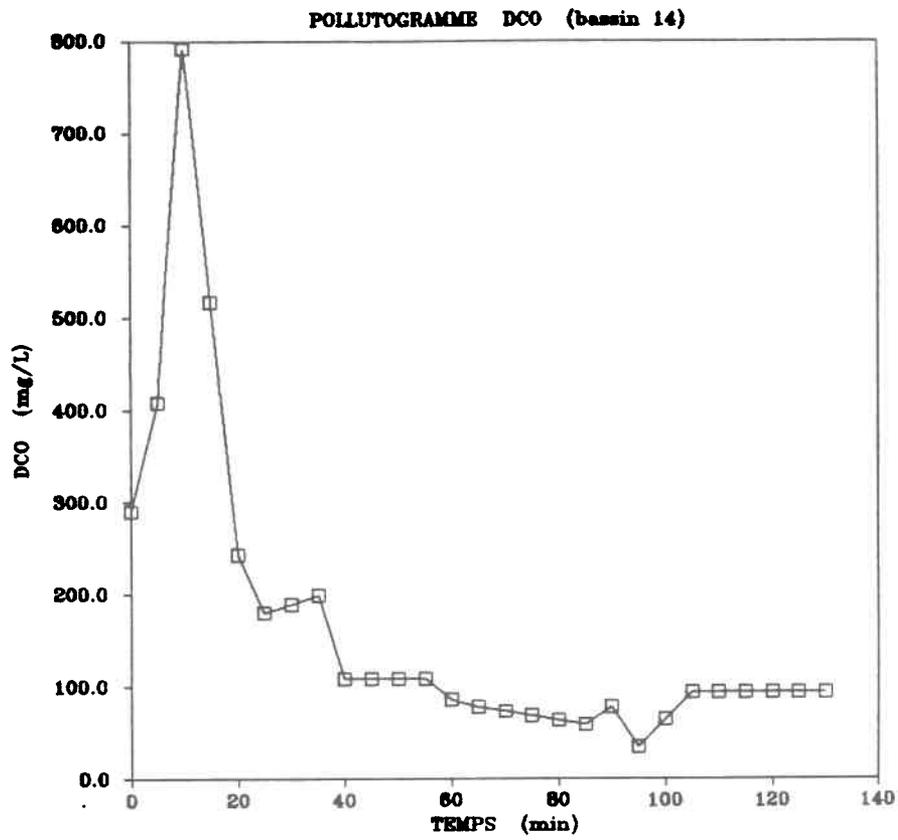
**Hydrogramme et pollutogrammes mesurés
à l'exutoire du bassin 14
pour la pluie du 22 juin 1982**

HYDROGRAMME (pluie 2 - bassin 14)

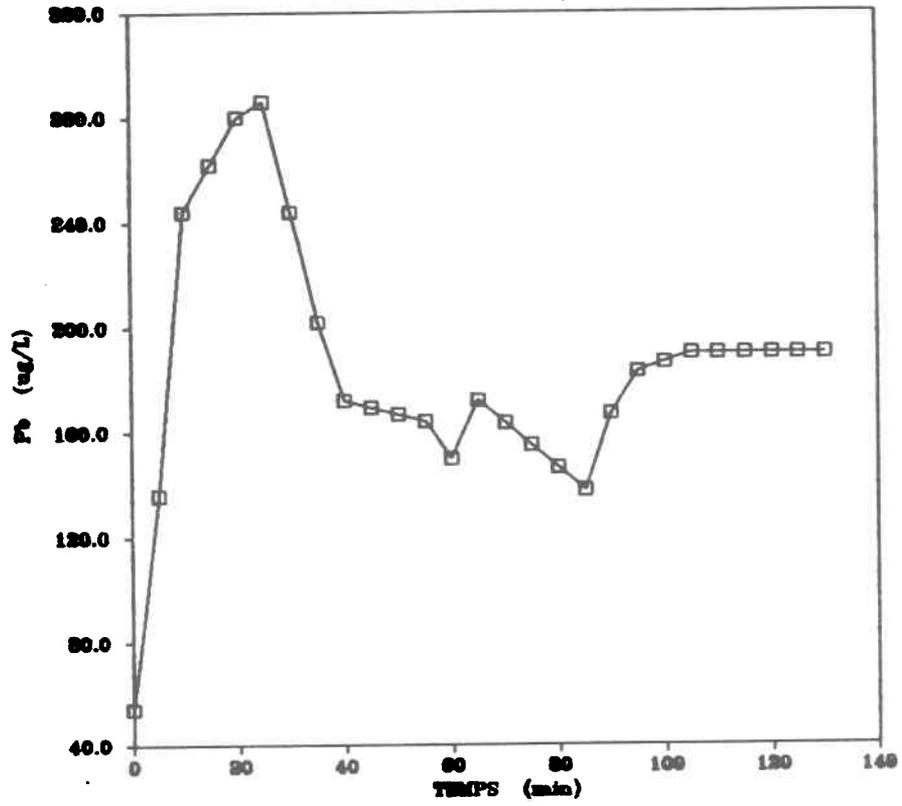


POLLUTOGRAMME MES (bassin 14)

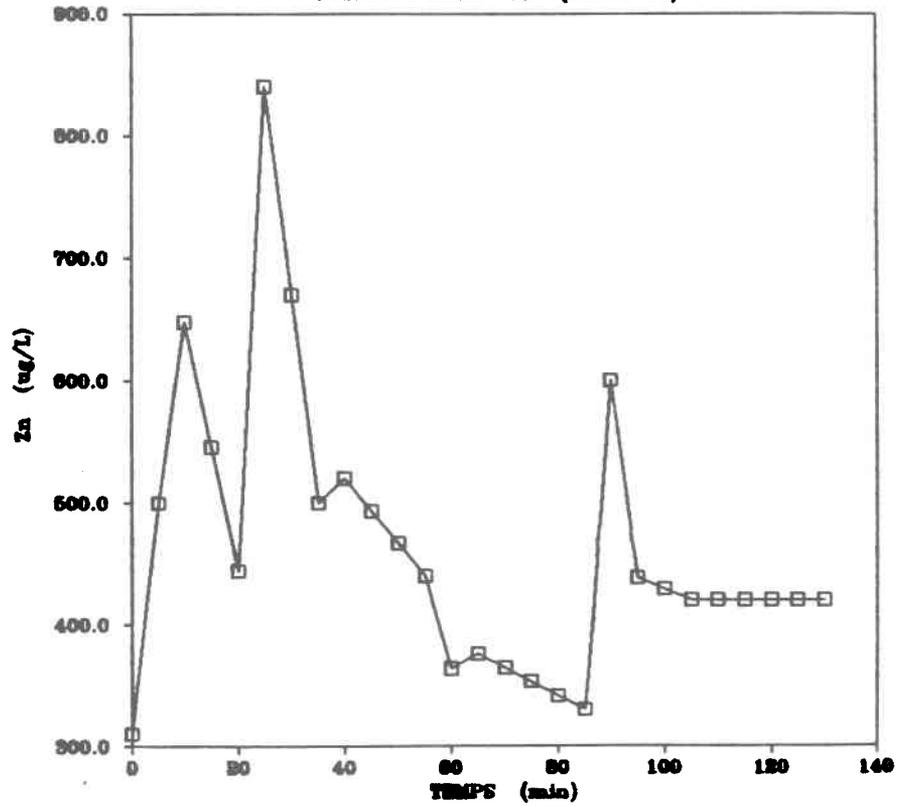




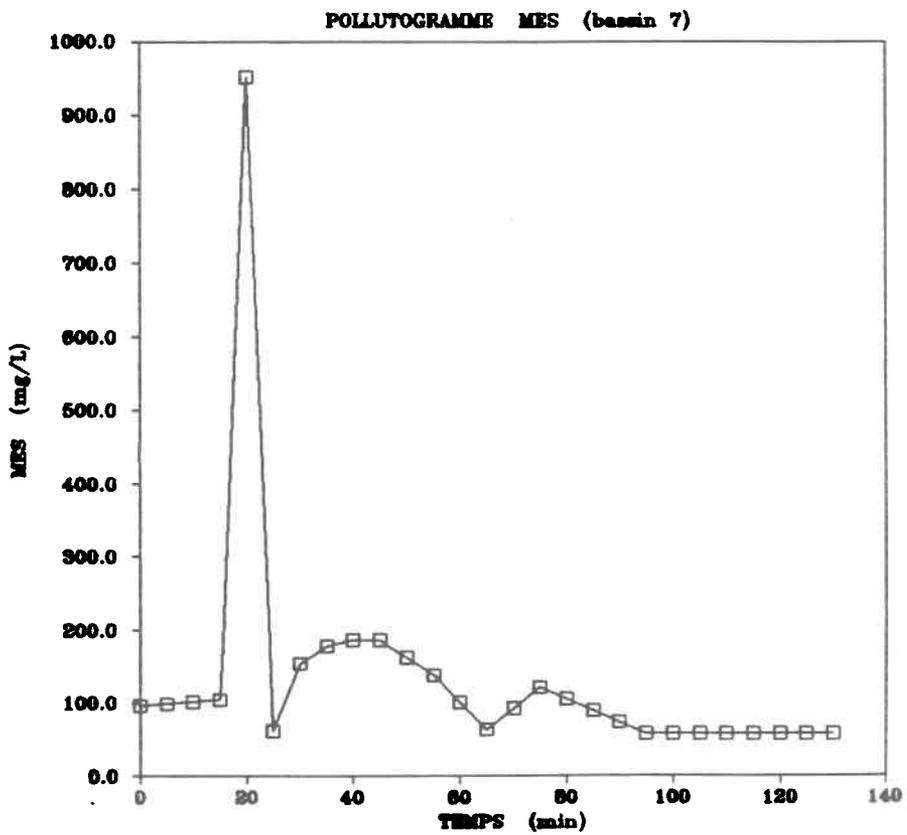
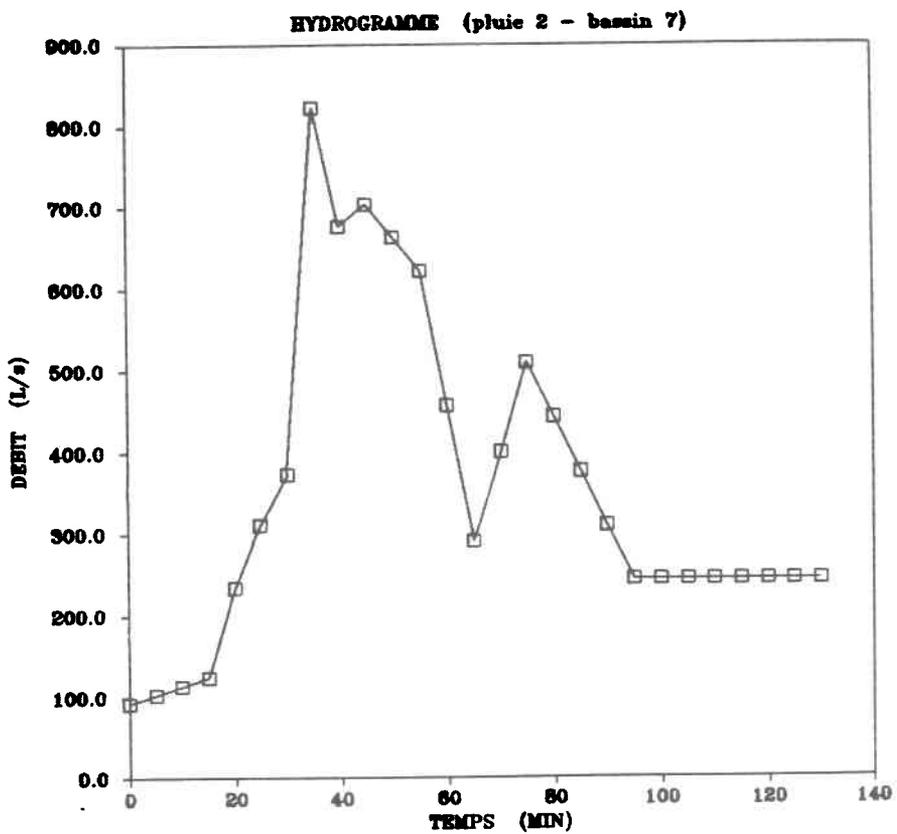
POLLUTOGRAMME Pb (bassin 14)

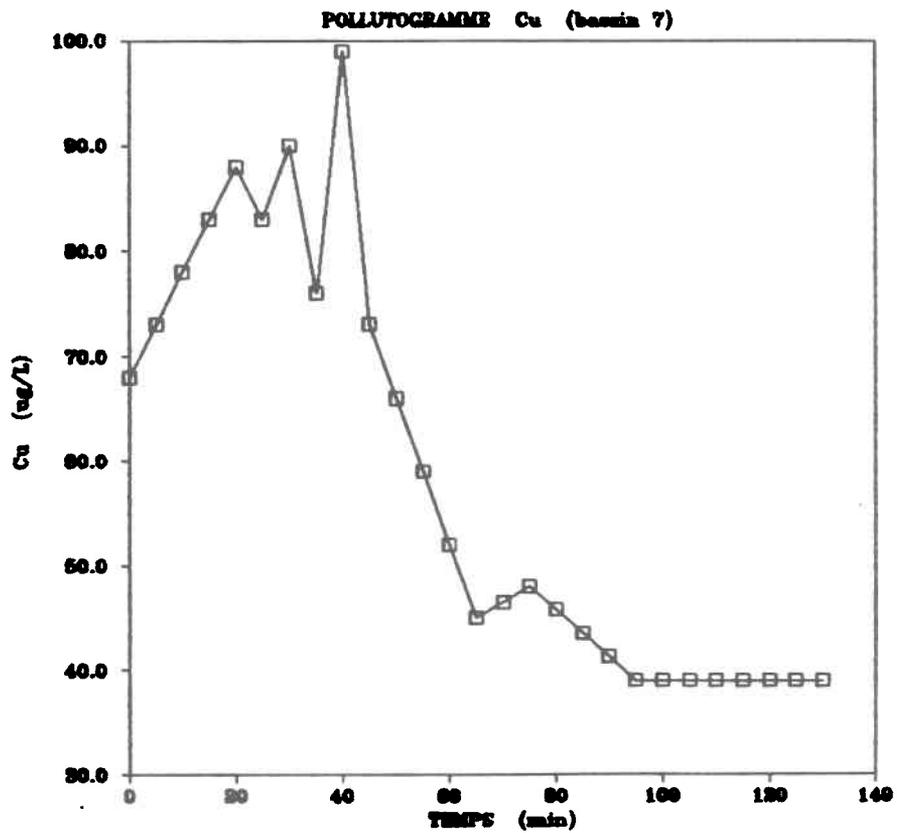
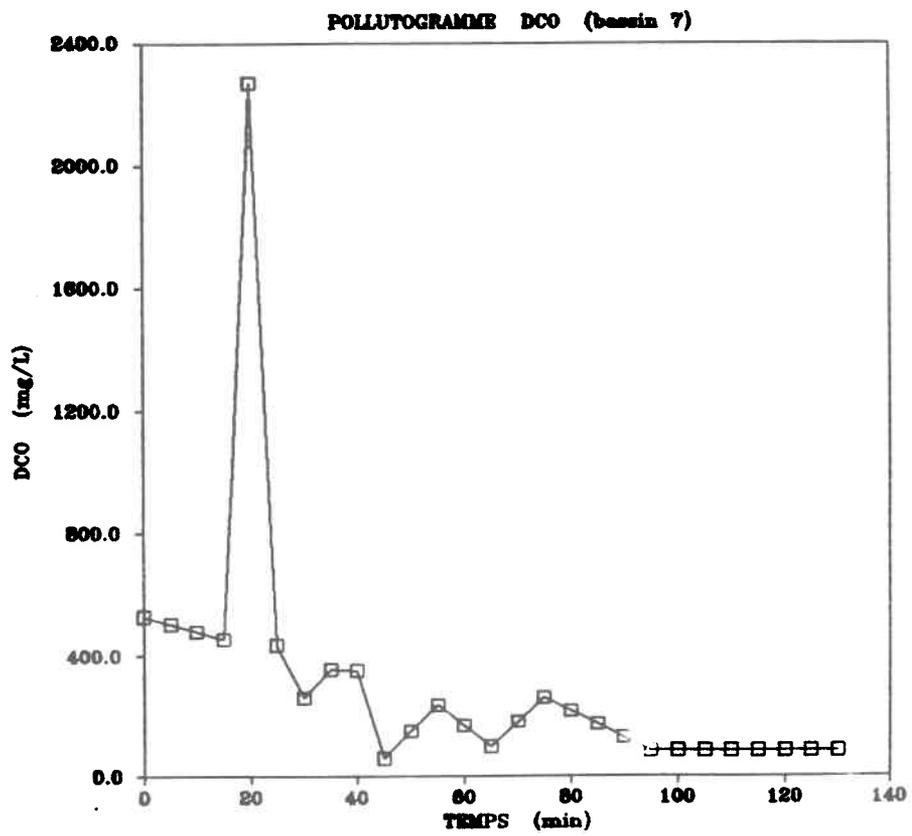


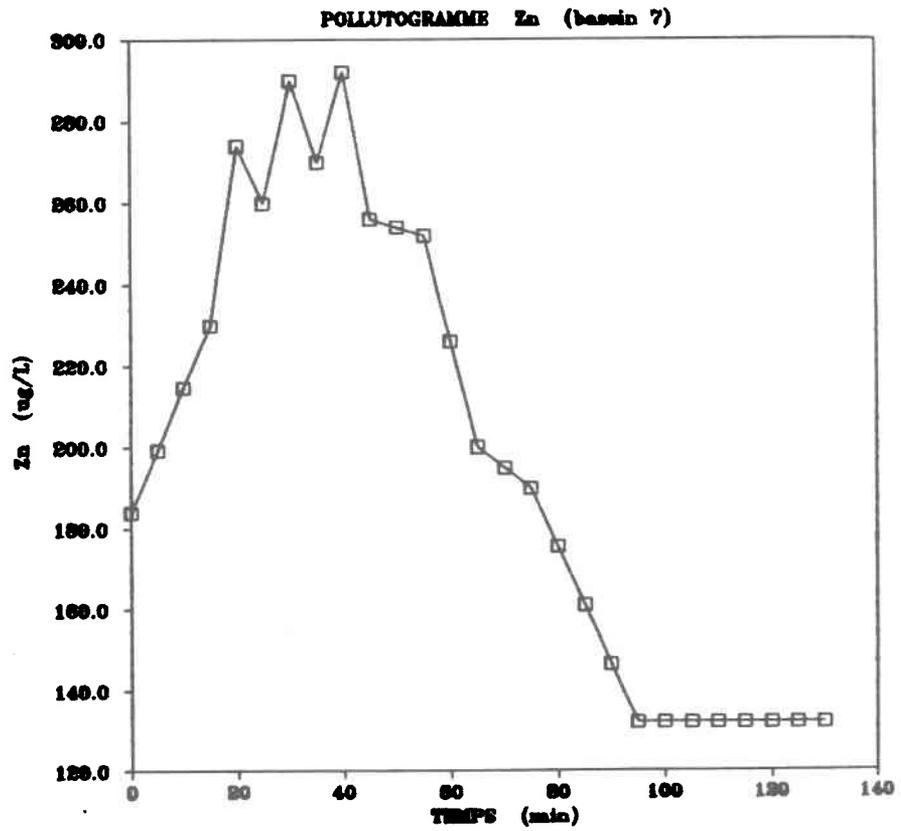
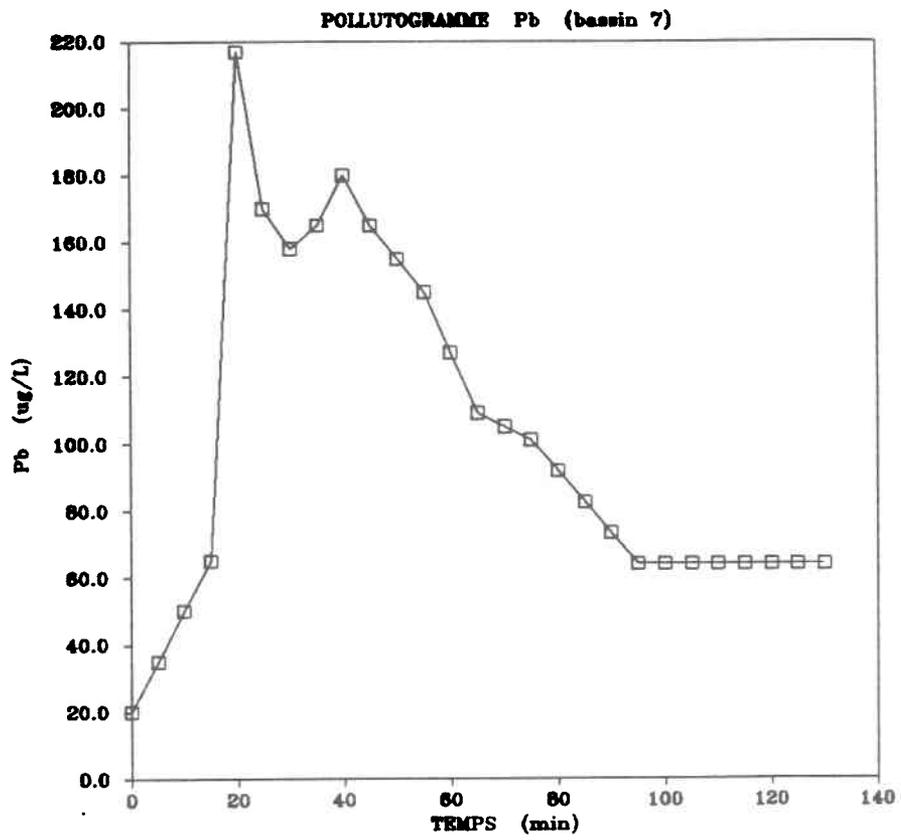
POLLUTOGRAMME Zn (bassin 14)



**Hydrogramme et pollutogrammes mesurés
à l'exutoire du bassin 7
pour la pluie du 22 juin 1982**







ANNEXE C

COMPLEMENT SUR LE CONTROLE AUTOMATIQUE DES RESEAUX UNITAIRES

Complément sur le contrôle automatique des réseaux unitaires

C.1 Les structures de régulation

Les équipements chargés de la régulation des eaux usées et d'orage sont habituellement situés aux points de raccordement des collecteurs unitaires avec l'intercepteur. Tout dépendant du mécanisme responsable du contrôle de l'écoulement, on distingue deux types de régulateurs : les régulateurs statiques et les régulateurs dynamiques.

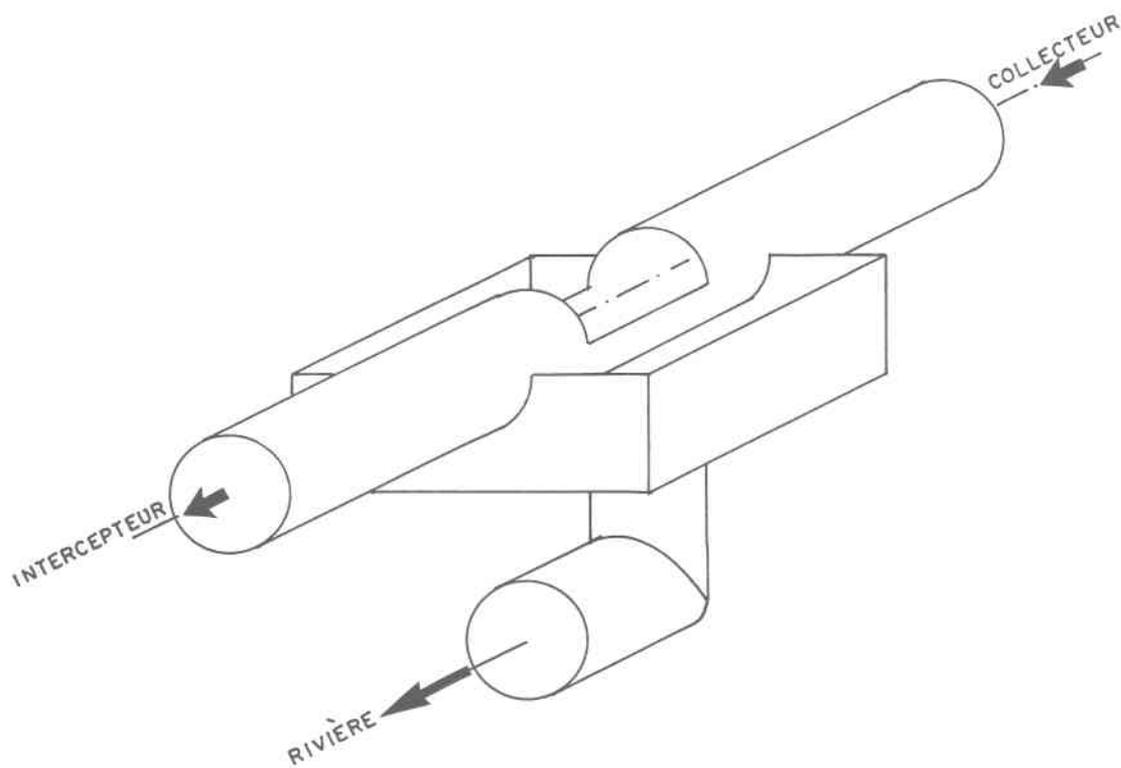
C.1.1 Les régulateurs statiques

Dans un régulateur statique, le contrôle du débit dirigé vers l'intercepteur est assuré par une structure fixe et passive. Un exemple bien connu est le déversoir latéral (**figure C.1**), dans lequel le débit de consigne qui doit être intercepté est celui qui correspond au seuil de l'ouvrage. Aussitôt que le débit en provenance du collecteur dépasse cette valeur de consigne, l'eau commence à déborder au-dessus du déversoir et est acheminée vers le cours d'eau récepteur.

En pratique, le déversoir latéral effectue une bien mauvaise régulation puisqu'il ne permet pas le maintien du débit de consigne. En effet, à mesure que le débit d'entrée s'élève par rapport au débit de seuil, le débit intercepté augmente lui aussi, quoique moins rapidement qu'en l'absence de toute structure de contrôle. La tâche principale du régulateur statique consiste donc à empêcher le débit envoyé à l'intercepteur de trop augmenter par rapport à la valeur de consigne.

Figure C.1

Déversoir latéral



C.1.2 Les régulateurs dynamiques

Les régulateurs dynamiques sont généralement composés de deux chambres séparées par une vanne ajustable. Le collecteur et la conduite de débordement sont connectés à la première chambre, tandis que l'intercepteur est relié à la seconde. C'est donc l'ouverture de la vanne qui va déterminer la grandeur du débit à intercepter.

Dans un régulateur dynamique, le débit admissible à l'intercepteur est contrôlé automatiquement au moyen d'un système d'auto-régulation comprenant un capteur, un contrôleur et un actionneur. Le rôle du capteur consiste à mesurer la valeur de la variable à contrôler, habituellement le niveau dans la seconde chambre du régulateur. Le contrôleur compare ensuite cette mesure avec la valeur désirée (point de consigne) et à l'aide d'un algorithme approprié, il détermine la correction qui s'impose. Celle-ci va être transmise à l'actionneur (hydraulique ou moteur électrique) qui va alors ajuster l'ouverture de la vanne murale donnant accès à l'intercepteur de façon à corriger l'erreur détectée par le contrôleur.

C.2 Les systèmes de contrôle des régulateurs dynamiques

Les systèmes de contrôle des régulateurs dynamiques peuvent être classés de différentes manières. Ainsi, au niveau de la technologie utilisée pour la transmission des signaux à l'intérieur de la boucle de contrôle, on peut faire la distinction entre les contrôleurs analogiques et les contrôleurs numériques. D'autre part, au niveau de l'emplacement des contrôleurs numériques, on va parler de contrôle distribué si chaque régulateur possède son propre contrôleur local, et de contrôle centralisé si tous les contrôleurs locaux sont remplacés par un ordinateur agissant à distance au moyen d'un système de télémétrie.

C.2.1 Les contrôleurs mécaniques

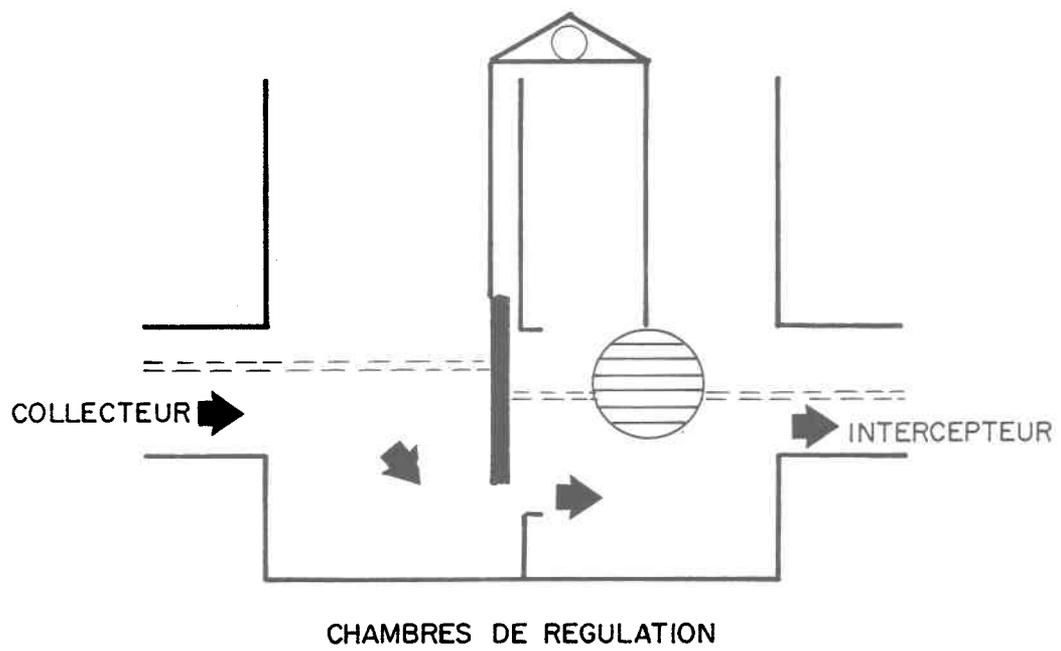
Les contrôleurs analogiques sont des appareils dont le fonctionnement reproduit, par analogie, la logique d'un algorithme de contrôle. L'exemple le plus courant est celui des contrôleurs mécaniques dans lesquels les signaux de réglage de la position des vannes murales sont transmis de façon mécanique par l'intermédiaire de chaînes, de leviers... Leur rôle consiste à envoyer à l'intercepteur tout le débit qu'ils reçoivent du collecteur, et ce, tant et aussi longtemps que ce débit est inférieur

au point de consigne qui leur a été assigné. Tout excédent est alors rejeté automatiquement au cours d'eau récepteur. Ainsi, en période de débordement, les contrôleurs mécaniques vont toujours diriger le même débit à l'intercepteur, peu importe le débit réel qui y circule.

Pour décrire le fonctionnement d'un régulateur dynamique équipé d'un contrôleur mécanique, consultons la **figure C.2**. On y voit que les variations du niveau d'eau dans la seconde chambre sont captées par le flotteur, puis transmises par l'intermédiaire du levier à la tige qui règle l'ouverture de la vanne murale. Ainsi, lorsque le débit en provenance du collecteur augmente, il en résulte une élévation du flotteur, ce qui force alors le levier à commander une baisse proportionnelle de la vanne. Le niveau étant maintenu constant dans la seconde chambre, le débit dirigé vers l'intercepteur va également demeurer constant.

Figure C.2

Régulateur dynamique équipé d'un contrôleur mécanique



L'action correctrice du contrôleur mécanique est déterminée par l'agencement des différentes pièces qui le constituent (par exemple, le rapport des longueurs des bras du levier) et son fonctionnement correspond généralement à un algorithme de type proportionnel. De plus, comme son point de consigne dépend des longueurs des tiges de la vanne et du flotteur, il ne peut être modifié à distance.

C.2.2 Les contrôleurs numériques

Les développements de la micro-informatique ont amené progressivement le remplacement des contrôleurs analogiques par des contrôleurs numériques, c'est-à-dire des microprocesseurs qui sont programmés pour exécuter un algorithme de contrôle donné avec une consigne conservée en mémoire.

Un premier avantage des contrôleurs numériques est qu'ils ne sont pas limités à l'exécution d'algorithmes conventionnels, comme c'était le cas pour les contrôleurs analogiques. En effet, comme leur fonctionnement est déterminé par un programme et non par un mécanisme, ils peuvent effectuer des tâches beaucoup plus complexes, qui auraient été impossibles à définir analogiquement. Leur deuxième avantage provient de leur plus grande souplesse d'utilisation puisque leur algorithme de contrôle peut être aisément modifié, de même que leur point de consigne.

Lorsque ces modifications sont effectuées à distance, à partir d'un ordinateur central qui est en communication directe avec chacun des contrôleurs locaux du réseau, on a un contrôle de type distribué. Chaque ouvrage de régulation est alors muni d'un contrôleur numérique chargé de l'ouverture et de la fermeture automatique des vannes motorisées, mais avec possibilité de modifier cet ajustement depuis le poste de commande.

Il est également possible de remplacer l'ensemble des contrôleurs locaux par un seul ordinateur, qui est relié au moyen d'un système de télécommunication à chacune des structures de régulation. Il s'agit alors d'un contrôle centralisé, à distance, où c'est l'ordinateur qui reçoit les mesures en provenance des capteurs et qui envoie lui-même les signaux de réglage aux actionneurs responsables du positionnement des vannes murales.

C.3 Les stratégies de contrôle

On peut distinguer deux classes de stratégies de contrôle : d'une part, les stratégies locales et intégrées; et d'autre part, les stratégies réactives et prédictives. Une stratégie est locale si chaque structure de régulation est contrôlée de manière

indépendante. Autrement, la stratégie est dite intégrée, et elle tient alors compte de l'ensemble des régulateurs du réseau. Egalement, une stratégie est réactive si seules les informations concernant l'état présent du système sont utilisées pour prendre les décisions de contrôle. Si en plus, on a recours à des prédictions de l'état futur du système, la stratégie devient alors prédictive.

C.3.1 Le contrôle réactif local

Dans une stratégie réactive locale, chaque contrôleur agit individuellement sans tenir compte des décisions adoptées par les autres contrôleurs du réseau. Les structures de régulation sont donc opérées de manière indépendante, chacune ne considérant que l'état du système dans son voisinage immédiat.

Lorsque la régulation est effectuée par des contrôleurs mécaniques, la stratégie a généralement pour but de s'assurer que l'intercepteur n'entrera pas en charge. Cependant, comme la configuration du contrôleur ne lui permet pas de tenir compte du débit réel qui circule dans l'intercepteur, on prévient la mise en charge en assignant à chacun des ouvrages de régulation une certaine fraction de la capacité totale de la conduite. Chaque contrôleur limite donc son apport au point de consigne qui lui est alloué, et ce, quel que soit la grandeur du débit véhiculé dans l'intercepteur.

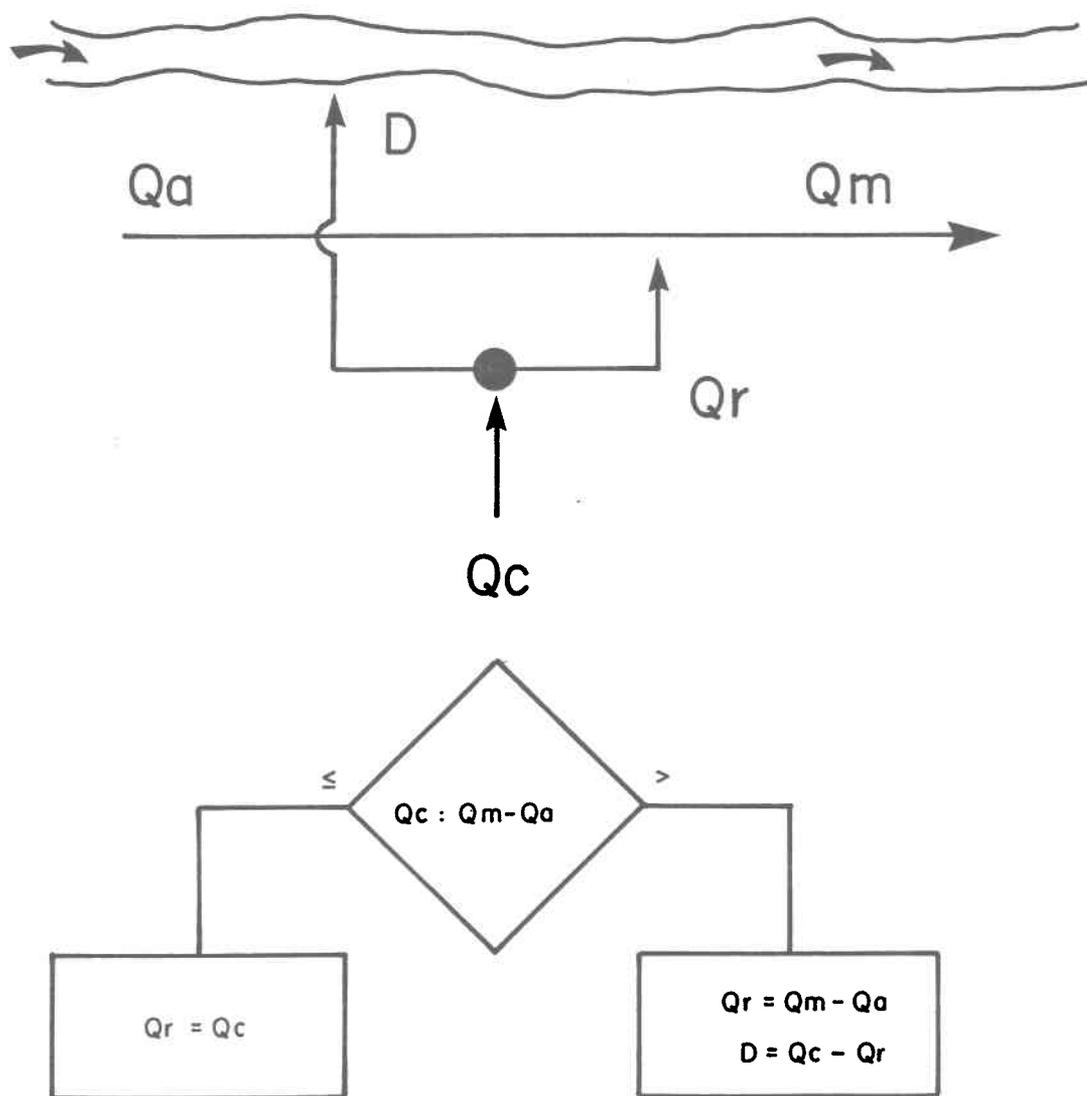
Le principal inconvénient d'une stratégie réactive locale effectuée au moyen de contrôleurs mécaniques est qu'elle ne permet pas la minimisation des volumes de débordement, puisque l'intercepteur n'est pas toujours utilisé à sa pleine capacité. En effet, il peut arriver qu'un régulateur soit forcé de faire des déversements alors qu'il y a encore de l'espace disponible dans l'intercepteur. Par exemple, dans le cas d'un orage localisé, on peut avoir une situation où des débordements se produisent aux régulateurs des bassins concernés, alors que l'intercepteur, coulant en deçà de sa capacité maximale, serait en mesure de recueillir un débit supérieur au débit de consigne de ces ouvrages.

On voit donc que la sous-utilisation de l'intercepteur est due au fait que la régulation est effectuée sans tenir compte du débit réel qui y circule. Pour corriger cette situation, il faut employer des contrôleurs qui permettent l'installation d'appareils de mesure dans l'intercepteur, comme par exemple des contrôleurs numériques.

L'algorithme de la stratégie réactive locale présenté à la **figure C.3** décrit une situation où le point de consigne de chacun des contrôleurs numériques est le débit maximal que peut accepter l'intercepteur. On a un premier capteur qui mesure le débit dans le collecteur et un second qui mesure le débit dans l'intercepteur en amont de la structure. Si le débit du collecteur est inférieur au débit disponible dans l'intercepteur ($Q_{\max} - Q_{\text{amont}}$), le contrôleur dirige alors le total de l'apport vers l'intercepteur. Autrement, cet apport est limité au débit disponible et le surplus est rejeté au cours d'eau.

Figure C.3

Algorithme du contrôle réactif local



Comme la tâche de chaque contrôleur est d'utiliser l'intercepteur au maximum, la stratégie va permettre de minimiser les rejets sur l'ensemble du réseau. Cependant, bien qu'elle soit globalement optimale en terme de volumes déversés, la stratégie n'a toutefois aucun contrôle sur la répartition de ces volumes.

Considérons par exemple le cas idéal d'un intercepteur de capacité constante et d'une pluie répartie également sur tout le réseau. Chaque contrôleur agissant de manière indépendante, ceux qui sont situés le plus en amont auront préséance sur les autres en période de pluie. Ils vont donc utiliser l'intercepteur à pleine capacité, sans égard aux besoins des contrôleurs qui sont plus en aval. La stratégie aura peut-être permis de minimiser les rejets sur l'ensemble du réseau, mais comme elle privilégie les régulateurs les plus en amont, les volumes déversés vont augmenter d'amont en aval. Ainsi, bien qu'elle permette la minimisation des volumes de débordement, la stratégie réactive locale ne pourra en influencer la répartition.

En terme d'impact sur le milieu récepteur, il peut parfois s'avérer souhaitable d'avoir une répartition des volumes de débordement qui soit différente de celle obtenue avec un contrôle réactif local, surtout si on désire tenir compte des sensibilités différentes des points de rejet. Pour obtenir cette autre répartition tout en s'assurant que le volume total déversé demeure inchangé, c'est-à-dire minimal, il faut toutefois que les contrôleurs agissent de concert. Ceci implique donc que pour permettre à un régulateur aval de disposer d'une part plus grande de la capacité de l'intercepteur, un régulateur situé en amont peut être appelé à augmenter ses débordements. Un tel mode d'opération n'est évidemment pas possible si les

contrôleurs agissent de façon indépendante, d'où l'intérêt d'une gestion intégrée des opérations.

Cependant, bien qu'une stratégie intégrée nous permette d'obtenir une distribution différente des débordements, elle ne nous garantit pas l'optimalité du contrôle en terme de volume rejeté. En effet, dans la stratégie réactive locale, le fait que chaque contrôleur utilise déjà au maximum la capacité de l'intercepteur nous assure la minimisation des volumes de débordement. Par conséquent, toute modification de l'ajustement des contrôleurs risque d'entraîner une augmentation des volumes débordés, à moins que ces modifications ne soient soigneusement calculées de façon à tenir compte du fait que les relations de cause à effet entre les régulateurs sont retardées par les délais d'écoulement dans le réseau.

Pour que la stratégie puisse prendre note du fait que des décisions appliquées en amont ne se répercutent pas immédiatement en aval, il lui faut connaître à l'avance l'état du système pour les pas de temps à venir; d'où la nécessité d'avoir recours à une stratégie prédictive intégrée.

C.3.2 Le contrôle prédictif intégré

C'est grâce à l'utilisation de prédictions de l'état futur du système qu'il devient possible de minimiser les volumes de débordement, tout en ayant un certain contrôle sur leur distribution spatiale et temporelle. L'opération optimale d'un réseau repose donc sur la capacité à anticiper son état futur sur une période de temps suffisamment longue pour pouvoir tenir compte du fait que les interactions entre les régulateurs sont retardées par les délais d'écoulement en conduite.

Il est donc avantageux d'utiliser une stratégie prédictive car elle va nous permettre de simuler l'évolution dans le temps du système et ainsi d'évaluer à l'avance les conséquences futures, à l'aval du réseau, de décisions présentes appliquées en amont. Ce faisant, elle va pouvoir transférer efficacement les débordements d'un point à un autre, sans pour autant augmenter le volume total des rejets.

La mise en oeuvre d'une stratégie prédictive intégrée va nécessiter l'utilisation des éléments suivants :

- un modèle de prédiction des débits attendus dans le réseau pour une période de temps appelée horizon de prédiction
- un modèle de simulation de l'écoulement en conduite
- un plan d'action définissant la marche à suivre de chacun des contrôleurs
- une fonction exprimant l'objectif global du contrôle
- une méthode d'optimisation capable de déterminer en temps réel le plan d'action optimal qui doit être appliqué

La tâche de l'ordinateur central chargé de la gestion du réseau consiste donc à déterminer, à chaque pas de temps, un plan d'action optimal définissant la suite d'actions à entreprendre à chacun des régulateurs, c'est-à-dire les points de consigne que doivent respecter les contrôleurs locaux de ces ouvrages. Pour ce faire, l'ordinateur doit d'abord connaître la situation actuelle du réseau, de même que

l'évolution de cette situation au cours des prochains pas de temps. A l'aide du modèle de simulation de l'écoulement, il va être en mesure de calculer, pour toute la durée de l'horizon de prédiction, les conséquences au niveau du réseau de l'application d'un plan d'action donné. Différents plans d'action vont être testés au moyen d'un algorithme d'optimisation, et celui qui va s'avérer optimal en regard de l'objectif du contrôle va finalement être appliqué. L'organigramme présenté à la **figure C.4** montre de quelle façon se déroule le contrôle dans une stratégie prédictive intégrée.

Figure C.4

Algorithme du contrôle prédictif intégré

