

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE

PRESENTE

A

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (EAU)

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA

MAITRISE ES SCIENCES (EAU)

PAR

HELENE WEBER

B.Sc. (CHIMIE)

"COMPARAISON DES METHODES D'EVALUATION  
DES DEBITS MASSIQUES"

JUIN 1978

## RESUME

L'interprétation des données de qualité du milieu est liée à la connaissance des débits massiques. Le débit massique instantané peut être évalué par la formule  $L = C \times Q$ . Cependant, suivant la fréquence des données disponibles, diverses méthodes ont été utilisées pour calculer le débit massique d'une période de temps donné. Dans cette étude, nous tentons d'évaluer, par simulation des séries de concentrations, la précision des débits massiques liée à la méthode de calcul en fonction de la fréquence d'échantillonnage et du type de variabilité des différents paramètres physico-chimiques.

Le modèle choisi pour générer les séries journalières de concentrations est le suivant:  $C = C_{\text{tendance}} + C_{\text{aléatoire}}$  où la tendance de base est dégagée pour chacun des paramètres de l'observation du profil de variabilité temporelle et la partie aléatoire est tirée d'une population normale. Les variables considérées sont la méthode de calcul, le pas de temps, la tendance de base et l'amplitude des fluctuations aléatoires. La comparaison entre le débit massique annuel de référence obtenu à partir des séries générées de 365 concentrations et d'une série connue de 365 débits liquides et les débits massiques calculés systématiquement pour 7 pas de temps et 3 méthodes, permet

de déterminer la meilleure méthode de calcul et la fréquence d'échantillonnage optimale pour un objectif de précision donné.

Ainsi, l'une des méthodes est à rejeter alors que les deux autres donnent des résultats similaires pour des pas de temps inférieurs à 15 jours; cependant, la méthode 3 qui procède par interpolation entre les dates d'échantillonnage, est préférable pour de plus grands pas de temps. D'autre part, il s'avère que la tendance elle-même a beaucoup moins d'influence sur la précision des débits massiques que l'amplitude des fluctuations aléatoires représentées par le coefficient de variation du paramètre.

La généralisation du modèle permet de mettre en évidence un léger gain de précision lorsque l'on passe d'un comportement caractérisé par un maximum en étiage à un comportement inverse. Pour les cas les plus fréquents étudiés, les résultats avec la méthode 3 sont exprimés en fonction du rapport des coefficients de variation des concentrations et des débits par une famille de courbes lissées correspondant aux fréquences d'échantillonnage. Ces courbes permettent de prévoir à  $\pm 10\%$  la précision des débits massiques liée à la méthode de calcul et à la série de concentrations. A celle-ci s'ajoute, en pratique, la précision des débits liquides qui demeurent le facteur ayant le plus d'influence sur les débits massiques.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier pour sa collaboration et sa disponibilité monsieur Daniel Cluis qui a dirigé ce travail ainsi que monsieur Bernard Bobée qui m'a judicieusement conseillée tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à monsieur Michel Meybeck qui a accepté de corriger le texte et à monsieur André Tessier qui m'a conseillée dans le choix des paramètres.

Je remercie aussi monsieur Pierre Dion pour la préparation des programmes de calcul sur ordinateur, monsieur André Parent pour l'élaboration des figures et graphiques, mademoiselle Louise Phaneuf pour le travail de dactylographie et monsieur Magella Cantin pour les travaux d'édition ainsi que tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidée à réaliser ce travail.

TABLE DES MATIERES

	Page
REMERCIEMENT . . . . .	i
RESUME . . . . .	ii
LISTE DES FIGURES . . . . .	vi
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	viii
1. POSITION DU PROBLEME . . . . .	1
1.1 Introduction . . . . .	1
1.2 Objectif de l'étude . . . . .	5
1.3 Définition du débit massique . . . . .	7
1.4 Méthodes de calcul du débit massique . . . . .	9
1.5 Données utilisées . . . . .	21
1.5.1 Données qualitatives . . . . .	21
1.5.2 Données quantitatives . . . . .	22
1.5.3 Station choisie . . . . .	22
2. METHODOLOGIE . . . . .	23
2.1 Etude des profils de variabilité temporelle . . . . .	24
2.1.1 Comportement des paramètres . . . . .	25
2.2 Simulation . . . . .	33
2.2.1 Modèle . . . . .	33
2.2.2 Cadre des simulations . . . . .	36
2.2.3 Hypothèses de simulation . . . . .	38
2.2.4 Procédure . . . . .	39

	Page
2.3 Application du modèle . . . . .	46
2.3.1 Application à Lennoxville . . . . .	48
2.3.2 Généralisation . . . . .	50
3. SYNTHÈSE DES RESULTATS . . . . .	56
3.1 Simulations à Lennoxville . . . . .	56
3.1.1 Influence du débit sur la précision des méthodes . . . . .	56
3.1.2 Efficacité des méthodes en fonction du pas de temps . . . . .	59
3.1.3 Comparaison des 3 méthodes de calculs des débits massiques . . . . .	59
3.1.4 Effet de l'augmentation de l'amplitu- de des fluctuations aléatoires $\sigma$ . . . . .	61
3.1.5 Influence de la tendance . . . . .	62
3.1.6 Courbes des erreurs relatives moyen- nes en fonction du coefficient de variation . . . . .	64
3.2 Simulations généralisées . . . . .	67
3.2.1 Résultats généraux déjà mis en évi- dence . . . . .	67
3.2.2 Influence de la tendance . . . . .	68
3.2.3 Application des courbes lissées au problème d'échantillonnage . . . . .	79
4. CONCLUSION . . . . .	81
BIBLIOGRAPHIE . . . . .	86
ANNEXE 1 - Concentrations des paramètres étudiés à Lennoxville . . . . .	92
ANNEXE 2 - Débits liquides à Lennoxville 1974 . . . . .	95
ANNEXE 3 - Programme SIMUL . . . . .	97
ANNEXE 4 - Précision des débits massiques . . . . .	104

## LISTE DES FIGURES

	Page
1 - Débits journaliers de la rivière Saint-François à Lennoxville (1974) . . . . .	37
2 - Schéma de la procédure des simulations . . . . .	47
3 - Tendence de base tracée sur le profil de variabilité temporelle . . . . .	49
4 - Représentation des tendances de base des cinq cas types . . . . .	54
5 - Précision des trois méthodes de calcul (cas de la silice, $\sigma = .4 \bar{X}$ ) . . . . .	57
6 - Précision des trois méthodes de calcul après décalage des débits de cinq jours (cas de la silice, $\sigma = .4 \bar{X}$ ) . . . . .	60
7 - Influence de l'amplitude des fluctuations aléatoires $\sigma$ sur la précision des méthodes (cas des sulfates) . . . . .	63
8 - Relation entre le coefficient de variation des concentrations $Cv_c$ et l'erreur relative pour les 7 pas de temps étudiés (cas de la silice, méthode 3) . . . . .	66
9 - Relation entre le rapport $Cv_c/Cv_q$ et l'erreur relative pour les 7 pas de temps étudiés (cas 5, méthode 3) . . . . .	70
10 - Courbes lissées de la précision en fonction du rapport $Cv_c/Cv_q$ pour les 7 pas de temps étudiés (cas 1, méthode 3) . . . . .	74
11 - Courbes lissées de la précision en fonction du rapport $Cv_c/Cv_q$ pour les 7 pas de temps étudiés (cas 2, méthode 3) . . . . .	75
12 - Courbes lissées de la précision en fonction du rapport $Cv_c/Cv_q$ pour les 7 pas de temps étudiés (cas 3, méthode 3) . . . . .	76

13 -	Courbes lissées de la précision en fonction du rapport $Cv_c/Cv_q$ pour les 7 pas de temps étudiés (cas 4, méthode 4) . . . . .	77
14 -	Courbes lissées de la précision en fonction du rapport $Cv_c/Cv_q$ pour les 7 pas de temps étudiés (cas 5, méthode 5) . . . . .	78

LISTE DES TABLEAUX

	Page
1 - Caractéristiques des concentrations et des débits des différentes méthodes de calcul du débit massique $L$ . . . . .	19
2 - Caractéristiques des tendances de base des huit paramètres étudiés à Lennoxville . . . . .	51
3 - Coordonnées des intersections des droites pour chacun des cinq cas types . . . . .	55
4 - Coefficients de variation des séries de concentrations simulées pour les huit paramètres étudiés à Lennoxville . . . . .	65
5 - Rapport des coefficients de variation des concentrations et des débits ( $C_{v_c}/C_{v_q}$ ) pour les cinq cas types étudiés . . . . .	69

## 1. POSITION DU PROBLEME

### 1.1 Introduction

Le réseau hydrométrique du Québec a débuté vers 1910 sous l'impulsion de la Commission des Eaux Courantes. Depuis cette époque la densité de stations s'est considérablement accrue et la fréquence de mesure a augmenté pour répondre à la plupart des besoins de connaissances quantitatives des ressources hydriques.

De même, l'établissement du réseau de Qualité des Eaux du Ministère des Richesses Naturelles a commencé vers 1967; après dix (10) ans d'opération de ce réseau, on peut considérer qu'un certain niveau de connaissance générale a été acquis pour les paramètres les plus usuels.

La rationalisation de l'acquisition de ces données de qualité du milieu implique le choix de paramètres représentatifs, l'identification de sites d'échantillonnage adéquats et aussi la détermination de la fréquence d'échantillonnage en fonction d'objectifs de précision fixés.

Les débits massiques sont un des facteurs importants de l'acquisition des données de qualité car ils représentent l'interface entre la géomorphologie et l'utilisation du territoire d'une part, et la qualité de l'eau, d'autre part. En

effet, les sources ponctuelles et diffuses contribuent différemment aux charges transitées selon les épisodes hydrologiques (crues ou étiages). Les débits massiques permettent l'évaluation du transport en rivière, le calcul des bilans par différence entre deux sections et la mise en évidence des phénomènes physiques, chimiques et biologiques.

Cependant, pour que les bilans saisonniers ou annuels aient une utilité, les débits massiques doivent être fiables et l'erreur commise dans leur estimation doit pouvoir être appréciée. Leur imprécision est liée non seulement aux erreurs de mesures des concentrations et des débits qui sont relativement bien connues aux jours d'échantillonnage, mais aussi à l'irrégularité de la distribution des concentrations entre les jours d'échantillonnage et à celle sur la distribution des débits. L'incertitude liée à la répartition des concentrations n'étant pas indépendante de celle des débits, l'expression algébrique de l'erreur relative d'une série des débits massiques peut être complexe; cependant, les techniques de simulation peuvent permettre l'évaluation de cette erreur.

Pour ce qui est de l'échantillonnage, Sherwani et Moreau (1975) ont mis en évidence l'importance d'une part, des mesures simultanées de concentrations et de débits lorsque l'on veut évaluer des débits massiques, et d'autre part, de la planification de l'échantillonnage en fonction d'objectifs précis tenant compte de l'utilisation du territoire. En effet, il existe une relation entre la concentration moyenne des eaux de

l'hydrogramme provenant des écoulements de surface, hypodermique et souterrain et l'utilisation du territoire c'est-à-dire l'origine des eaux. Ainsi, dans le cas de sources ponctuelles, l'utilisation du territoire (forêts, pâturages, cultures, urbanisation, etc...) affectera surtout les eaux de ruissellement alors que dans le cas de sources diffuses, les eaux souterraines seront principalement affectées; de plus, ces deux types de sources contribuent, de façon différente, à l'accroissement des concentrations selon les épisodes hydrologiques. Sherwani et Moreau (1975) ont également fait ressortir la variabilité saisonnière de la qualité de l'eau en insistant sur le fait qu'il n'y a pas de fréquence d'échantillonnage optimale pour toute l'année ou pour tous les paramètres, mais que l'on doit envisager des fréquences saisonnières relatives à chaque paramètre.

Dans le même sens, une étude de Centreau (1974) sur la simulation du transport solide des rivières Châteauguay et Chaudière met en évidence qu'une forte proportion des débits massiques annuels est liée à la crue; ainsi, pour connaître des débits massiques saisonniers d'une courte période comportant une crue, il faut procéder à un échantillonnage plus intense pendant cette période en raison de la grande variabilité de débits. L'étude de Centreau (1974) fait ressortir l'importance primordiale du débit moyen et du coefficient de variation de la crue dans le transport en suspension.

Précisons que l'échantillonnage du réseau de qualité

est périodique et de fréquence très variable bien que l'on cherche de plus en plus à le rationaliser. Une quantité impressionnante de mesures effectuées à des fréquences variées et donc d'interprétation difficile a ainsi été accumulée. Dans le cas des données hydrologiques, disponibles depuis environ cinquante (50) ans, l'amélioration du matériel et des techniques de mesures permet maintenant l'enregistrement presque continu des débits (une mesure toutes les quinze minutes pour le réseau hydro-métrique du Québec); les valeurs de faibles pas de temps sont donc facilement accessibles aux stations de mesures ou peuvent être simulées avec une bonne précision par des modèles hydrologiques.

Cependant, l'échantillonnage concomittant des concentrations et des débits est exceptionnel dans les divers services gouvernementaux. Les stations d'échantillonnage des paramètres physico-chimiques et les stations de mesure de débits sont différentes, d'où l'utilisation, dans le calcul des débits massiques, de données disjointes et de fréquences variées.

Les lois de variation des concentrations en fonction des débits ont été peu étudiées et sont souvent complexes car reliées à la composition de l'eau de l'hydrogramme; de même, l'évolution des concentrations réelles dans le temps est peu connue. Il faut donc en pratique, à partir des séries partielles de concentrations, le plus souvent mensuelles, et des débits liquides journaliers, envisager diverses méthodes simples d'estimation des débits massiques; elles sont, à priori, toutes

justifiables puisque la précision du débit massique ainsi obtenue en fonction du pas de temps choisi et de la variabilité du paramètre n'a pas été établie; et c'est là l'objet de la présente étude.

## 1.2 Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude est de comparer différentes méthodes de calcul des débits massiques en fonction de la fréquence d'échantillonnage et de la variabilité temporelle des concentrations. Ceci permettra d'identifier, pour un paramètre ou un ensemble de paramètres ayant le même comportement global, la meilleure méthode pratique d'évaluation des débits massiques, de déterminer l'influence du pas de temps sur la précision des débits massiques et éventuellement, d'établir une relation entre la précision des débits massiques et la fréquence d'échantillonnage pour différents types de variabilité.

Après avoir fait l'inventaire des méthodes de calcul du débit massique, on choisit parmi les méthodes utilisées en pratique celles qui feront l'objet de la comparaison. A une station donnée, les profils de variabilité des paramètres mesurés sont étudiés et un modèle simple de simulation des différents types de variabilité est établi; il permet, dans chacun des cas, la comparaison systématique, en fonction du pas de temps, des débits massiques calculés par les différentes méthodes retenues.

La simulation permet, pour un profil de base donné, de

généraliser des séries synthétiques de concentrations ayant les mêmes caractéristiques statistiques que la série historique; dans les séries simulées, des tirages à diverses fréquences sont effectués pour former des séries partielles de concentrations qui servent à l'évaluation des débits massiques par l'une ou l'autre des méthodes. Le débit massique de référence est obtenu en effectuant la sommation des débits massiques journaliers de la série synthétique complète; on suppose ainsi que la variabilité à l'intérieur de la journée est faible. Les résultats pour chacune des méthodes sont exprimés sous forme d'erreur relative moyenne; il s'agit d'étudier l'imprécision liée à la répartition des concentrations en excluant les erreurs dues à la répartition des débits et les erreurs de mesures des concentrations et des débits. Pour chacun des paramètres étudiés, l'erreur relative est représentée graphiquement, pour différents pas de temps d'échantillonnage, en fonction du coefficient de variation.

Puis, pour élargir la portée de cette étude, des cas types sont simulés; ils représentent la gamme des profils des concentrations variant du cas du maximum en période de crue (et du minimum en étiage) à la situation opposée. Cette généralisation conduit à l'établissement de courbes de précision des débits massiques telle que définie par l'erreur relative en fonction de coefficients de variations des paramètres impliqués; les mêmes débits liquides sont utilisés tout au long de l'étude et un seul mode de simulation des concentrations a été considéré. Les courbes résultantes constituent un outil utile à la détermination de la fréquence d'échantillonnage optimale en fonction

d'un objectif de précision fixé, dans le cadre des hypothèses de l'étude.

Ainsi, ce travail, sans être exhaustif, a des implications au niveau du calcul et de l'interprétation des débits massiques ou des bilans et contribue à la rationalisation de l'acquisition de données.

### 1.3 Définition du débit massique

Le débit massique d'une substance est la quantité de celle-ci qui traverse une section transversale d'un cours d'eau par unité de temps. Une étude relative au calcul des bilans de substances nutritives dans le Saint-Laurent (INRS-eau 1976 d) résume les aspects théoriques concernant le calcul du débit massique et les erreurs associées. L'équation générale d'un débit massique dans une section de rivière s'écrit:

$$Q_m = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \int_0^x \int_0^y c(x, y, t) \cdot v(x, y, t) dx dy dt$$

où  $c(x, y, t)$  est la concentration en un point  $x, y$  de la section à l'instant  $t$ ;

$v(x, y, t)$  est la vitesse en un point  $x, y$  de la section à l'instant  $t$ ;

$\tau$  est le temps pendant lequel on évalue le débit massique;

$x$  et  $y$  sont les coordonnées d'un point de la section.

Sous cette forme intégrale, cette équation est inutilisable, mais la sommation des mesures ponctuelles et simultanées en différents points de la section permet d'obtenir une approximation suffisante. L'équation peut être réduite, en faisant les hypothèses habituelles d'uniformité ou d'homogénéité, à des expressions simples impliquant moins de mesures. Mais en pratique, nous ne disposons que d'une mesure de concentration et de débit par section transversale, mesures qui ne sont, en général, pas simultanées. On admet donc, par nécessité, que l'échantillon est représentatif de la section de la rivière. Comme les fréquences d'échantillonnage des concentrations et des débits sont différentes (les concentrations sont souvent mensuelles alors que les débits journaliers sont en général accessibles), plusieurs techniques ont servi à évaluer la masse transitée pendant une période où l'on ne dispose que de quelques valeurs de concentration.

Avant de faire une brève revue de littérature sur la question, il est bon de préciser le sens des termes utilisés. Le débit massique est appelé couramment charge, apport ou bilan. Si le débit massique représente le transport par unité de temps (par seconde), la charge ou l'apport correspond à la masse transitée pendant une période de temps (jour, mois, etc...). Le terme bilan ne devrait servir qu'à désigner la différence entre les débits massiques de deux sections transversales d'un cours d'eau.

#### 1.4 Méthodes de calcul du débit massique

Dès les premières études de variabilité temporelle de la composition chimique de l'eau, on s'aperçut très tôt (Forel 1886) que la salinité des rivières était approximativement inversement proportionnelle au débit, en raison du phénomène général de dilution. De tous les facteurs affectant la composition chimique d'une rivière en un point donné, le débit est le plus important. Ce type de variation est très général et a été décrit pour de nombreuses rivières très différentes (Durum 1953, Iaworska 1968, etc...).

C'est pourquoi la plupart des auteurs ont cherché à faire intervenir la variation des concentrations en fonction du débit dans les calculs de charges (Hall 1970 et 1971, Carbonnel et Meybeck 1975). Ainsi Meybeck (1972) décrit les méthodes utilisées, relativement à l'établissement d'une relation entre les concentrations et les débits:

- . méthodes des classes de débits (Hembree et Rainwater 1961, Hall 1970 et 1971).
- . méthodes des classes de charges (Henson 1971).
- . méthodes des conductivités (Ledbetter et Gloyna 1964, Hendrickson et Krieger 1964, etc...).

Pour sa part, St-Martin (1967 et 1970), en étudiant les relations entre les facteurs d'ordre géologique et les caractéristiques de l'écoulement, a trouvé qu'il n'existe pas de

relation biunivoque concentration-débit en période d'étiage, c'est-à-dire que, pour les débits faibles provenant de l'écoulement souterrain, une même concentration peut correspondre à plusieurs débits. Il définit alors une courbe maîtresse qui donne l'allure générale des concentrations pour toute la gamme possible des débits d'étiages.

De manière générale, les études ont porté, pour les éléments dissous, sur la variation de la concentration globale (ou salinité) représentée par la conductivité et, pour les éléments en suspension, sur la variation de la turbidité. Notons que le transport dissous est un phénomène continu et régulier influencé par les débits alors que le transport solide est irrégulier, discontinu et augmente avec le débit principalement durant la crue. Pour les deux types de transport considérés globalement, de bonnes corrélations peuvent exister. Cependant, le comportement d'ions particuliers (chlorures ou bicarbonates) est, la plupart du temps différent, la corrélation avec le débit étant souvent faible ou inexistante. Pinder et Jones (1969) citent le cas des phosphates et des nitrates entre autres et, Cluis et Durocher (INRS-eau, 1976 c), dans une étude des substances nutritives (azote total et phosphore total), rapportent qu'aucune corrélation ou relation simple n'a pu être mise en évidence. C'est le cas, en général, des apports provenant simultanément de sources ponctuelles et naturelles.

Ajoutons ici qu'il y a une tendance naturelle à représenter les débits massiques en fonction des débits liquides.

Cette représentation graphique est légitime mais c'est l'interprétation que l'on fait qui peut conduire à des résultats erronés puisqu'une partie de l'information que l'on croit obtenir, est déjà incluse dans la formulation des variables utilisées. En effet, Benson (1965) a démontré que la corrélation du produit de deux variables avec l'une des variables conduit à une corrélation fictive de  $\sqrt{2}/2$ , alors que la corrélation entre les deux variables de base peut être nulle. Dans cette optique, pour éviter des conclusions erronées, aucune interprétation en terme de corrélation entre les débits massiques et les débits liquides n'a été tentée dans la présente étude.

Quant au calcul pratique des débits massiques, il repose sur la méthode classique qui peut être utilisée pour tout élément, mais requiert un échantillonnage journalier (si les variations horaires sont négligeables). La formule de base est la suivante:

$$L = K \sum_{i=1}^n c_i q_i$$

où  $L$  est le débit massique en  $g/an$  par exemple;

$c_i$  est la concentration journalière en  $mg/l$ ;

$q_i$  est le débit journalier en  $m^3/s$  ;

$K$  est le facteur de conversion d'unités;

et  $n$  est le nombre de jours considérés.

Elle représente la sommation, pour une période de  $n$  jours (un an par exemple), des débits massiques journaliers obtenus en associant à chaque débit journalier la concentration correspondante.

Cette formule de base s'exprime sous différentes formes suivant les hypothèses supplémentaires que l'on fait lorsque, en pratique, la fréquence d'échantillonnage n'est pas journalière. Ce sont certaines des formules approchées, développées à partir de différentes hypothèses sur la répartition des concentrations et des débits entre les jours d'échantillonnage et utilisant différemment l'information disponible qui font l'objet de la présente étude. Elles seront comparées à la formule de base de façon à évaluer la perte d'information résultant, par exemple, de l'utilisation d'une donnée instantanée à de plus ou moins grands intervalles pour représenter ce qui se passe pendant l'intervalle.

Signalons cependant que, pour répondre à des cas concrets, des auteurs ont utilisé des méthodes de calcul des débits massiques faisant intervenir la concentration moyenne sur une base annuelle ou saisonnière (INRS-eau 1976 a); l'originalité de ces méthodes était de vouloir déterminer la meilleure formule d'évaluation de la concentration moyenne (moyenne arithmétique, moyenne pondérée, moyenne pondérée par les classes de débits, etc...), et non de tenter d'obtenir la meilleure estimation du débit massique à partir de séries partielles de concentrations. De même, les débits massiques en ions majeurs ont été calculés pour le lac St-Jean (INRS-eau 1978) en utilisant les

concentrations et débits moyens par saison, les données ayant été acquises à des fréquences variables et irrégulières. Ces méthodes d'usage moins courant n'entrent pas dans le cadre de la présente étude.

Dans les formules découlant des différents modes d'utilisation de la formule de base, les indices sont choisis de façon à bien distinguer les méthodes de calcul les unes des autres. L'indice  $i$  est l'indice journalier; l'utilisation des valeurs journalières réelles des paramètres est indiquée par l'indice  $n$  alors que l'indice  $j$  réfère aux jours d'échantillonnage; un pas de temps de  $t$  jours donne lieu à des périodes de  $t$  jours réparties de part et d'autre du jour d'échantillonnage. Le nombre de périodes  $p$  est égal au quotient du nombre de jours considérés dans les calculs,  $n$ , par le nombre de jours,  $t$ , de la période ( $p = \frac{n}{t}$ ).

Ainsi, lorsque la fréquence d'échantillonnage n'est pas journalière, en faisant l'hypothèse que la concentration et le débit sont constants pendant chaque période de  $t$  jours et sont respectivement égaux à la concentration et au débit du jour d'échantillonnage  $j$  de la période,

$$\text{pour } p = 1 \quad c_1 = c_2 = \dots \dots \dots c_t = c_{j_1}$$

$$q_i = q_2 \quad \dots \dots \dots q_t = q_{j_1}$$

$$\text{pour } p = 2 \quad c_{t+1} = c_{t+2} = \dots \dots \dots c_{2t} = c_{j_2}$$

$$q_{t+1} = q_{t+2} = \dots \dots \dots q_{2t} = q_{j_2}$$

pour  $p = n/t$   $c_{1+(p-1)t} = c_{2+(p-1)t} = \dots \dots \dots c_{pt} = c_{j_p}$

$$q_{1+(p-1)t} = q_{2+(p-1)t} = \dots \dots \dots q_{pt} = q_{j_p}$$

le débit massique  $L_1$  des  $p$  périodes est:

$$L_1 = Kt [ c_{j_1} q_{j_1} + c_{j_2} q_{j_2} + \dots \dots \dots + c_{j_p} q_{j_p} ]$$

$$L_1 = Kt \sum_{k=1}^p c_{j_k} q_{j_k} \quad (1)$$

où  $K$  est le facteur de conversion.

Cette formule présente, en général, peu d'intérêt parce qu'elle n'utilise, pour les débits, que l'information d'un seul jour par période (celui de l'échantillonnage) alors que les débits journaliers sont généralement disponibles (par mesure ou estimation); la variation des débits, souvent très importante, est complètement négligée; des épisodes hydrologiques (crues ou étiages) peuvent être laissés pour compte si le nombre de prélèvements n'est pas assez élevé, compte tenu du régime de la rivière.

Cette méthode a été utilisée par Campbell et al. (INRS-eau 1976 a) pour le calcul des débits massiques de cuivre

et de zinc dans les rivières Yamaska et Saint-François. La fréquence d'échantillonnage des concentrations étant faible (une mesure par deux mois environ), le débit massique ainsi calculé pour un jour du mois était une estimation du débit massique journalier de ce mois. Pour ces auteurs, les facteurs faisant varier journalièrement les concentrations étant inconnus, il semblait illusoire de les estimer par interpolation entre les dates d'échantillonnage.

On peut aussi opter pour l'hypothèse suivante: pendant chaque période de  $t$  jours, la concentration est constante et égale à celle du jour d'échantillonnage  $j$  de la période; les débits journaliers réels sont utilisés. Dans ce cas,

$$\text{pour } p = 1 \quad c_1 = c_2 = \dots \dots \dots c_t = c_{j_1}$$

$$q_1 = q_{n_1} ; q_2 = q_{n_2} ; \dots \dots \dots q_t = q_{n_t}$$

$$\text{pour } p = 2 \quad c_{t+1} = c_{t+2} = \dots \dots \dots c_{2t} = c_{j_2}$$

$$q_{t+1} = q_{n_{t+1}} ; q_{t+2} = q_{n_{t+2}} ; \dots \dots \dots q_{2t} = q_{n_{2t}}$$

$$\text{pour } p = n/t \quad c_{1+(p-1)t} = c_{2+(p-1)t} \dots \dots \dots c_{pt} = c_{j_p}$$

$$q_{1+(p-1)t} = q_{n_{1+(p-1)t}} ; q_{2+(p-1)t} = q_{n_{2+(p-1)t}} ;$$

$$\dots \dots \dots q_{pt} = q_{n_{pt}}$$

le débit massique  $L_2$  est:

$$L_2 = K [ c_{j_1} [ q_{n_1} + q_{n_2} + \dots + q_{n_t} ] + c_{j_2} [ q_{n_{t+1}} + q_{n_{t+2}} + \dots + q_{n_{2t}} ] + \dots + c_{j_p} [ q_{n_{1+(p-1)t}} + q_{n_{2+(p-1)t}} + \dots + q_{n_{pt}} ] ]$$

$$L_2 = K [ c_{j_1} \sum_{i=1}^t q_{n_i} + c_{j_2} \sum_{i=t+1}^{2t} q_{n_i} + \dots + c_{j_p} \sum_{i=1+(p-1)t}^{pt} q_{n_i} ]$$

si l'échantillonnage est régulier  $p=j$  et la formule précédente devient:

$$L_2 = K [ \sum_{k=1}^p c_{j_k} \sum_{i=1+t(j-1)}^{txj} q_{n_i} ]$$

$$\text{si } \frac{1}{t} \sum_{i=1+t(j-1)}^{txj} q_{n_i} = \bar{q}$$

où  $\bar{q}$  est le débit moyen d'une période de  $t$  jour comportant un jour d'échantillonnage  $j$ ,

l'expression du débit massique est alors:

$$L_2 = Kt \sum_{k=1}^p c_{j_k} \bar{q} \quad (2)$$

Cette méthode n'est pas, à notre connaissance, citée dans la littérature; elle est cependant intéressante puisqu'elle utilise plus d'information (les débits de chaque jour) que la précédente d'autant plus que la variabilité du produit est en grande partie contenue dans celle du débit.

Une autre hypothèse est celle de la variation régulière de la concentration entre les dates d'échantillonnage, ce qui conduit à utiliser les concentrations journalières obtenues par interpolation linéaire entre les valeurs  $c_j$  des jours d'échantillonnage et les débits journaliers. Si  $c'_i$  est la concentration journalière interpolée et  $q_{ri}$  le débit réel, pour chacun des jours considérés,

$$c_i = c'_i$$

$$q_i = q_{ri}$$

$$c'_i = c_j + \frac{[c_{j+1} - c_j]}{t} \cdot [i - (txj) - \frac{(t-1)}{2}]$$

$$txj - \frac{[t-1]}{2} \leq i \leq t(j+1) - \frac{[t+1]}{2}$$

$$1 \leq j \leq p + 1$$

le débit massique  $L_3$  s'exprime alors pour  $p$  périodes de  $t$  jours:

$$L_3 = K \sum_{i=1}^n c'_i q_{ri} \quad (3)$$

C'est de cette façon que furent calculés, pour les bassins des rivières Yamaska et Saint-François, les débits massiques (charges) saisonniers et annuels en azote total et phosphore total qui ont servi à la calibration du modèle d'apports (INRS-eau 1976 c) et à l'étude des substances nutritives (INRS-eau 1976 a); les concentrations mesurées à une fréquence plus faible ayant une variabilité nettement inférieure à celle des débits générés à une plus forte fréquence, il s'agissait d'un cas relativement favorable pour la précision des débits massiques. L'utilisation des débits moyens journaliers représentatifs a été jugée nécessaire au maintien d'une précision acceptable sur l'estimation du débit massique. Les auteurs signalent que ce mode de calcul a déjà été utilisé, avec succès, par Taylor et al. (1971) selon les recommandations de Borman et Likens (1967). L'interpolation linéaire des concentrations, choisie pour sa simplicité, pourrait éventuellement être améliorée. Cette même méthode a servi aussi à évaluer les débits massiques en fer et manganèse des rivières Yamaska et Saint-François.

Si l'on considère que les débits journaliers sont en général disponibles alors que les concentrations sont connues à des fréquences plus ou moins faibles et si l'on admet que la variabilité des débits est au moins égale à celle des concentrations, les autres hypothèses pouvant être considérées apparaissent sans intérêt pratique; en effet, les trois cas précédemment décrits donnent lieu aux formules les plus usuelles.

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques ap-

plicables aux concentrations et aux débits qui sont à l'origine des formules approchées possibles; il identifie celles qui sont comparées par la suite.

concentration débit	journalière	constante pendant la période	interpolée entre les dates d'échantillonnage
constant pendant la période		$L_1$	
journalier	$L = L_0$	$L_2$	$L_3$
moyen de la période		$L_2$	

Tableau 1 : Caractéristiques des concentrations et des débits des différentes méthodes de calcul du débit massique  $L$ .

La comparaison se fera donc entre la formule générale applicable lorsque l'on dispose de données journalières:

$$L = K \sum_{i=1}^n c_i q_i$$

qui permettra de calculer le débit massique de référence

$$L_0 = K \sum_{i=1}^n c_{n_i} q_{n_i} \quad (0)$$

où  $c_{n_i}$  et  $q_{n_i}$  sont les valeurs journalières réelles des paramètres et, les formules approchées utilisables lorsque l'on dispose de données de fréquence plus faible que le jour soient:

$$L_1 = Kt \sum_{k=1}^p c_{j_k} q_{j_k} \quad (1)$$

$$L_2 = Kt \sum_{k=1}^p c_{j_k} \bar{q} \quad (2)$$

$$L_3 = K \sum_{i=1}^n c'_i q_{n_i} \quad (3)$$

qui correspondent respectivement aux méthodes 1, 2 et 3 auxquelles le texte réfère. Les détails d'indiciation des périodes et des jours apparaissent dans les trois sous-routines correspondantes du programme SIMUL présenté en annexe.

Le but de la comparaison est de déterminer laquelle des trois méthodes conduit à la plus petite erreur par rapport à la méthode de base ( $L_0$ ) qui utilise toute l'information disponible.



- les paramètres physico-chimiques: solides en suspension, conductivité, oxygène dissous, turbidité, pH et température.

Seules les concentrations des échantillons naturels (non filtrés) sont considérées.

#### 1.5.2 Données quantitatives

Les débits utilisés dans les calculs sont les débits moyens journaliers simulés par le modèle hydrologique CEQUEAU (Morin, Charbonneau 1975) aux stations d'échantillonnage de qualité. Leur précision est de  $\pm 20\%$  sous couvert de glace et de 10 à 15% en été.

#### 1.5.3 Station choisie

Comme il a été indiqué précédemment, seule la variabilité temporelle des concentrations des échantillons naturels est prise en compte; la station choisie pour l'étude est celle de Lennoxville (station 03021V) parce que pour l'ensemble des paramètres, les mesures y furent plus fréquentes (bi-mensuelles) qu'à toute autre station pendant toute la durée de l'étude des bassins des rivières Yamaska et Saint-François. Cependant, les données aux autres stations servent à vérifier, selon le cas, la conformité des comportements à Lennoxville avec ceux du bassin hydrographique.

## 2. METHODOLOGIE

La première étape devant conduire à la comparaison des méthodes de calcul des débits massiques identifiées consiste à étudier les profils de variabilité temporelle des paramètres couramment échantillonnés afin d'en dégager des profils de base représentatifs des comportements les plus fréquents de façon à établir l'influence de la tendance sur le comportement des différentes méthodes.

Dans une deuxième étape, il s'agit de choisir le modèle de simulation qui permettra de générer des séries de concentrations journalières réalistes, de décrire le cadre général des simulations et les hypothèses qu'il implique. Puis, il faut établir la procédure c'est-à-dire l'ensemble des opérations nécessaires à la mise en oeuvre des simulations dont la programmation des calculs, le choix du mode d'expression des résultats, le nombre adéquat de simulations, etc...

La troisième étape est l'application du modèle de simulation aux paramètres retenus à la station de Lennoxville puis à des cas hypothétiques plus généraux. Le modèle de simulation est appliqué en faisant varier la méthode de calcul, la fréquence d'échantillonnage, l'amplitude des fluctuations aléatoires et la tendance de base des concentrations, facteurs en fonction desquels est interprétée la précision des débits mas-

siques.

## 2.1 Etude des profils de variabilité temporelle

La variabilité de la composition chimique d'une rivière est fonction de la composition du débit, des épisodes hydrologiques et des caractéristiques des apports naturels et artificiels. Il existe donc toute une gamme de profils de variabilité temporelle à une station donnée pour différents paramètres et pour un paramètre donné à différentes stations. De façon générale, le comportement des concentrations d'ions majeurs sont fonction de la nature géologique du sous-sol et ont sensiblement le même comportement dans un bassin versant donné. Par contre, les substances nutritives sont davantage fonction de l'utilisation du sol et leurs débits massiques peuvent être influencés par les sources ponctuelles; leur comportement est alors beaucoup plus spécifique.

Il est évident qu'à priori, la meilleure façon de connaître correctement les variations temporelles de concentrations est de procéder à un échantillonnage journalier à la condition que les variations horaires soient minimales. Des mesures avec une telle fréquence ne sont que rarement disponibles, économiquement difficiles à justifier et ne sont sans doute pas nécessaires. En fait, à partir des courbes de variations annuelles établies avec des données mensuelles ou bi-mensuelles, il semble possible de faire ressortir un phénomène de base qui

soit caractéristique d'un paramètre donné indépendamment de la station.

Ceci est d'autant plus intéressant que l'utilisation des profils réels pour la comparaison des débits massiques limiterait considérablement la portée de l'étude, les résultats s'appliquant à un paramètre dans des conditions très précises plutôt qu'à un type de variation (profil de base) représentant un paramètre ou un ensemble de paramètres à plusieurs stations.

Ainsi, l'étude des profils de variabilité des paramètres à une station donnée pendant une période suffisamment longue pour vérifier la stabilité du comportement général permet de dégager des profils de base simples (représentant un ou plusieurs paramètres) qui puissent être simulés facilement, de générer des séries de concentrations journalières réalistes et conduit à des résultats applicables à tout paramètre ayant le même type de comportement à la condition que les débits en cause soient comparables:

#### 2.1.1 Comportement des paramètres retenus à Lennoxville

La station de Lennoxville est située au centre du bassin de la rivières Saint-François et draine une superficie de 4246 km<sup>2</sup>. Les concentrations des échantillons naturels de tous les paramètres pour lesquels il y avait la moitié ou plus des données disponibles sont mises en graphique pour l'année

1974 puis pour l'année 1975 afin de vérifier si l'évolution temporelle est stable. Les ions majeurs sont, comme prévu, reliés à la conductivité. Les paramètres physico-chimiques (solides en suspension, oxygène dissous, conductibilité, température, pH, turbidité) sont éliminés car ils n'ont même pas, sauf la conductivité, l'intérêt anticipé de faire ressortir des tendances.

Les comportements des deux années sont cohérents pour la plupart des paramètres mais une tendance générale est difficile à visualiser; c'est pourquoi les courbes des valeurs mensuelles 1974-75 sont tracées pour les ions majeurs  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Cl}^{-1}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , la silice et les substances nutritives azote total, nitrates et phosphore total; ce sont ces paramètres que nous désirons étudier. L'azote total et le phosphore total sont des paramètres d'origine variée, caractéristiques de la fertilité, donc d'intérêt particulier. Les formes de phosphore sont en très faibles concentrations dans le bassin de la rivière Saint-François et particulièrement les phosphates et le phosphore inorganique qui sont presque toujours inférieurs à la limite de détection; ils ne sont donc pas retenus. De même, les ions majeurs sodium et potassium qui sont en faible concentration et se comportent souvent comme l'ion calcium sont abandonnés.

En général, l'intérêt se porte sur les charges en substances nutritives; en effet, les charges en ions majeurs sont encore peu utilisées mais ces paramètres nous fournissent

un éventail de profils de base intéressants.

Les comportements se dégagent nettement des courbes des concentrations mensuelles des années 1974 et 1975 regroupées, tracées en fonction du temps pour les paramètres retenus. Les exemples du fer et des sulfates sont montrés à la figure 3. Les caractéristiques de chacun de ces paramètres se résument ainsi :

calcium : un minimum est observé à la crue printanière et un maximum en étiage; le calcium a pour origine les eaux souterraines d'où la diminution de concentration avec l'augmentation de débit due au phénomène de dilution des eaux souterraines chargées par les eaux de surface moins chargées. Ceci correspond au comportement du calcium décrit en littérature. La concentration moyenne annuelle à Lennoxville est de 10.98 mg/l.

sulfates : ces ions majeurs font partie du groupe de paramètres dont la concentration diminue avec l'augmentation du débit; celle-ci diminue jusqu'en avril, période de crue, puis augmente jusqu'en octobre. Une partie de cette concentration est fonction de la géologie régionale et provient de la dissolution des roches par les eaux souterraines alors qu'une autre partie, reliée aux activités humaines,

est d'origine atmosphérique sous forme d'anhydride sulfureux et atteint les nappes d'eau par l'intermédiaire des précipitations acides, la dissolution donnant lieu à des ions sulfites surtout et à des ions sulfates. La concentration moyenne des sulfates à Lennoxville est de 7.50 mg/l.

fer : la concentration minimale de l'ion fer est observée en février mais reste faible jusqu'en mai; le maximum apparaît en juillet, période d'étiage; le fer provient comme le calcium et les sulfates de sources diffuses et est fonction de la géologie de la région; sa concentration est cependant plus faible que celles des ions calcium et sulfates, la concentration moyenne à Lennoxville étant de 0.23 mg/l.

magnésium : ce paramètre se comporte comme les précédents ce qui implique qu'il est fortement lié au débit et provient de sources diffuses; le minimum s'observe en mai et le maximum en août. La concentration moyenne à Lennoxville est de 2.8 mg/l.

chlorures : la concentration des chlorures est élevée en

février, mars et avril, diminue en mai puis augmente pour la période d'étiage; ce paramètre est plus variable, moins relié au débit et en faible teneur dans les eaux souterraines; il est d'origine atmosphérique; les argiles marins de la mer de Champlain sont une des sources des chlorures. La concentration moyenne annuelle à Lennoxville est de 2.8 mg/l.

- silice : la silice est reliée au cycle des diatomées la concentration diminue jusqu'à l'été au fur et à mesure de son incorporation dans les organismes et augmente à l'automne à la mort de ceux-ci; elle n'est pas fonction du débit mais plutôt des saisons. La concentration moyenne à Lennoxville est de 4.2 mg/l.
- nitrate : la concentration des nitrates est exprimée en azote (N); elle est indirectement reliée à l'assimilation de l'azote d'où le comportement cyclique annuel observé; la concentration est maximale au printemps et minimale à l'été (de juin à septembre); la concentration des nitrates provenant de sources diffuses, elle augmente avec le débit à cause du lessivage des sols et du ruissellement plus importants en

période de crue. Les nitrates peuvent provenir aussi de sources ponctuelles dont l'influence se fait sentir surtout en période d'étiage alors que le ruissellement est minime. Ces sources ponctuelles sont principalement les égouts urbains, ruraux et industriels. La concentration moyenne à Lennoxville est de 0.3 mg/l; elle est fonction des apports dus à la pollution qui sont relativement faibles pour la station considérée.

azote total : les échantillons naturels (non-filtrés) d'azote total N regroupent les formes organique et ammoniacale d'azote et les nitrates; la variation de l'azote total est cyclique comme pour les nitrates mais d'amplitude plus faible puisque c'est un paramètre intégrateur qui tient compte du passage d'une forme à l'autre. Les sources sont les mêmes que celles des nitrates. La concentration moyenne à Lennoxville est de 0.4 mg/l.

phosphore total: le phosphore total dans les échantillons naturels, exprimé en phosphore P, représente le phosphore inorganique c'est-à-dire toutes les formes hydrolysables de phosphore et le phosphore organique. Aucune cyclicité annuelle

est observée dans le cas du phosphore total; la concentration augmente avec le débit à cause du lessivage des sols, ce qui implique qu'une partie du phosphore provient de sources diffuses et est fonction du ruissellement. Pendant les périodes d'étiage, les apports en phosphore sont dus surtout aux sources ponctuelles telles les égouts urbains et industriels dont la fréquence plus ou moins régulière explique l'apparition momentanée de maxima; mais ceux-ci s'ajoutent toute l'année durant à un seuil de concentration relativement faible dans la rivière Saint-François.

De façon générale, la quantité de substances nutritives provenant de sources diffuses et transportées par ruissellement est fonction de la topographie du bassin, du couvert végétal, de l'utilisation du sol, de l'intensité et la durée du ruissellement, de la pollution, de l'utilisation d'engrais, etc... Les profils observés sont donc plus particuliers aux stations, pour les substances nutritives que pour les ions majeurs. A Lennoxville, une combinaison de sources diffuses et ponctuelles est responsable des quantités de substances nutritives mesurées dans les eaux de la rivière Saint-François; les sources diffuses étant prédominantes au printemps et à l'automne et les sources ponctuelles à l'été et l'hiver. Les eaux provenant des sources ponctuelles sont généralement plus chargées en phosphore

qu'en azote alors qu'en général, la contribution en phosphore des précipitations est plus faible que celle d'azote; elle sera cependant plus importante dans les régions agricoles. Pour leur part, les eaux souterraines sont peu chargées en substances nutritives; cette faible contribution, en phosphore particulièrement, est due à son utilisation par le biota, à la percolation du sol et à l'insolubilité des minéraux contenant du phosphore.

L'analyse des profils de variabilité de ces neuf (9) paramètres permet de les classer en fonction des variations du débit; on remarque

- . les paramètres dont la concentration diminue avec l'augmentation de débit: calcium, sulfates, fer, chlorures et magnésium;
- . les paramètres dont la concentration augmente avec le débit: nitrates, azote total et phosphore total;
- . les paramètres dont la concentration semble indépendante du débit: la silice.

Ces comportements observés à Lennoxville sont cohérents avec ceux rapportés dans d'autres études et se retrouvent à d'autres stations d'échantillonnage au niveau du bassin de la rivière Saint-François et au niveau de la province.

Ce sont ces neuf (9) profils, représentant la gamme des comportements qui, dans la présente étude, servent à déterminer, par simulation, l'influence de la tendance sur l'efficacité des méthodes de calcul des débits massiques.

## 2.2 Simulation

Nous avons, dans l'introduction, justifié notre choix de procéder par simulation des profils de base pour comparer les méthodes usuelles d'évaluation des débits massiques plutôt que d'effectuer des développements théoriques.

La simulation, en plus d'être accessible et souple, a l'avantage d'offrir toute une gamme de possibilités. Plusieurs types de simulation peuvent être envisagés; il importe cependant de choisir le plus pertinent compte tenu de l'objectif que nous nous sommes fixés et du cadre restreint de cette étude.

### 2.2.1 Modèle

L'analyse des profils de variabilité à Lennoxville nous a permis de constater qu'à travers les fluctuations plus ou moins grandes des concentrations se dégagent toujours, pour une période d'un an, une tendance de base.

C'est pourquoi, pour simuler de façon réaliste l'évolution des concentrations des paramètres retenus à Lennoxville,

nous choisissons d'associer à chacun d'eux une cyclicité annuelle (comportant un maximum en étiage ou en crue, etc...), et d'y ajouter des valeurs journalières aléatoires distribuées normalement, de moyenne zéro et d'amplitude égale à l'écart-type ( $\sigma$ ) des concentrations effectivement mesurées; l'écart-type est défini par:

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Le modèle peut être représenté par la formule suivante:

$$c_s(t) = c_t(t) + c_a(t)$$

où  $c_s(t)$  est la concentration simulée au jour  $t$ ,

$c_t(t)$  est la concentration fixée par la tendance de base au jour  $t$

et  $c_a(t)$  est la concentration aléatoire tirée d'une population normale au jour  $t$ , de moyenne 0, de variance  $\sigma^2$ .

Cette formulation correspond à la décomposition du profil observé; ainsi, pour un jour donné, la concentration simulée d'un paramètre, servant aux calculs des débits massiques, est égale à la concentration fixée par la tendance attribuée à ce paramètre au même jour à laquelle on a ajouté une concentration aléa-

toire tirée d'une population normale.

La tendance de base est déterminée en faisant passer une ou deux droites par l'ensemble des points expérimentaux de moyenne  $\bar{x}$  et d'écart type  $\sigma$ . Les coordonnées des points d'intersection sont alors fixées; ce sont eux qui servent à générer les concentrations journalières considérées dans le modèle. Cette simulation est intéressante parce qu'elle nous ramène à des cas simples, facilement généralisables à d'autres stations et pour d'autres paramètres. Ce sont les fluctuations aléatoires de part et d'autre de la tendance qui apportent l'aspect irrégulier observé pour les différents comportements.

Le principal intérêt de ce modèle de simulation est l'étude de la variation de l'amplitude des fluctuations aléatoires; en effet, pour une tendance donnée, l'écart type ( $\sigma$ ) peut varier de façon à correspondre à toute une gamme de coefficients de variation ( $Cv$ ) des concentrations; celui-ci est défini par  $Cv = \sigma/\bar{x}$  où  $\bar{x}$  est la concentration moyenne et est caractéristique de la variabilité des comportements.

Il est alors possible d'exprimer les résultats en fonction des coefficients de variation ( $Cv$ ) pouvant correspondre pour une tendance donnée à plusieurs paramètres. Les résultats peuvent aussi être exprimés en fonction du rapport des coefficients de variation des concentrations et des débits ( $Cv_c / Cv_q$ ).

### 2.2.2 Cadre des simulations

Rappelons que la précision d'une série de débits massiques est non seulement liée aux erreurs de mesure des concentrations et des débits mais aussi à l'estimation de la répartition inconnue des concentrations et des débits entre les jours d'échantillonnage. Par simplification et pour évaluer l'incertitude liée aux concentrations pour chacune des trois méthodes comparées, nous faisons l'hypothèse que les débits liquides sont connus sans erreur et que l'intervalle de temps pendant lequel le débit massique est évalué ( $\Delta t$ ) est constant.

De plus, une seule série de débits est utilisée pour tous les calculs; il s'agit des débits journaliers de Lennoxville pour l'année 1974, simulés par le modèle hydrologique CEQUEAU (Morin, Charbonneau 1975) dont l'hydrogramme est présenté à la figure 1. Bien que particuliers et induisant des singularités dans les résultats, ces débits sont caractéristiques du sud du Québec, représentent le comportement général des débits de cette région et par conséquent, sont intéressants à utiliser. Leur coefficient de variation de .85 est supérieur à celui des concentrations étudiées.

Il faut donc interpréter avec prudence des résultats en fonction du coefficient de variation ou en fonction du rapport des coefficients de variation des concentrations et des débits lorsque, comme c'est le cas dans cette étude, les mêmes débits liquides servent à tous les calculs. Les courbes qui peuvent en être déduites n'ont rien d'universel du moins tant

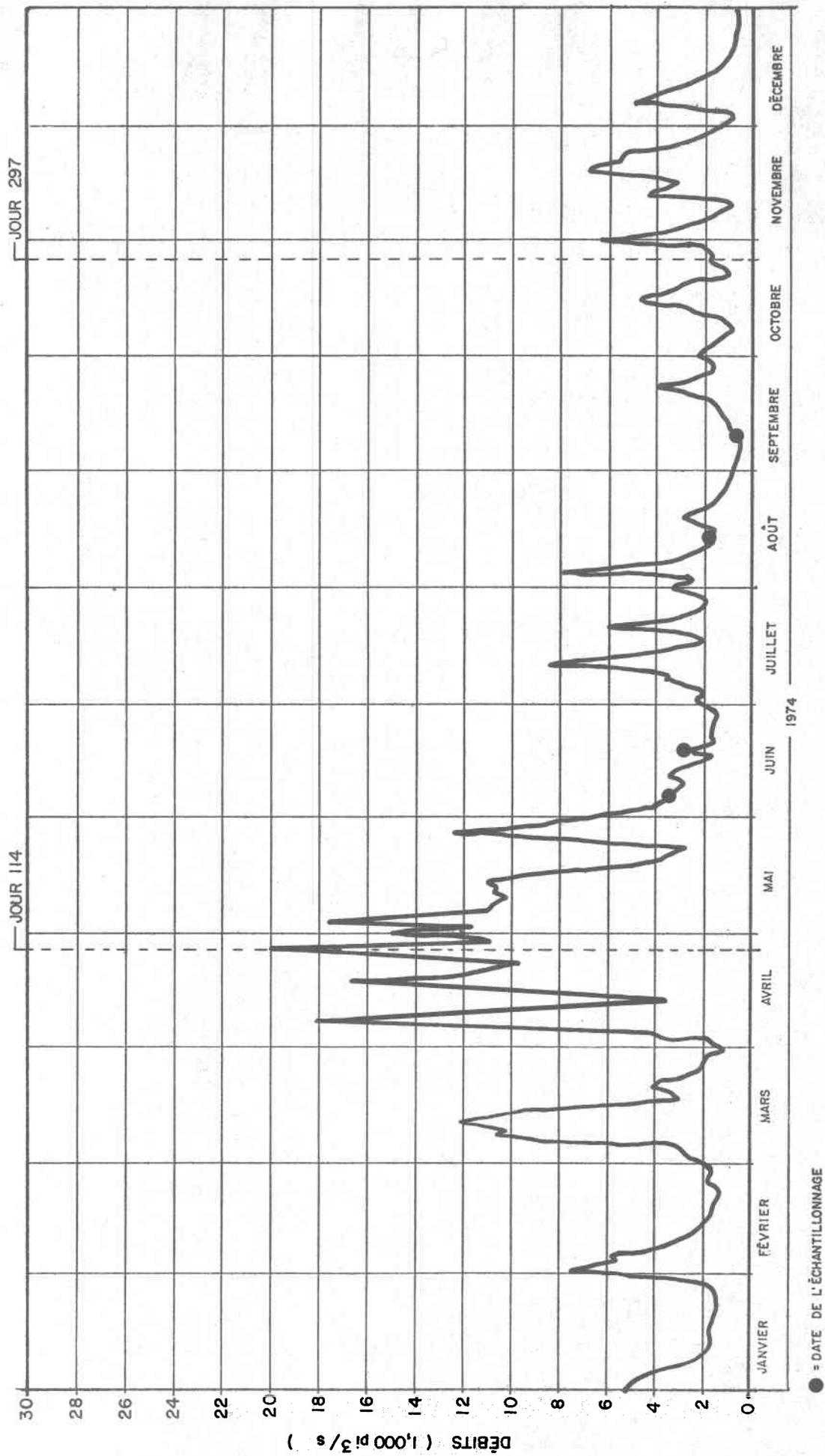


Figure 1 . Débits journaliers de la rivière Saint-François à Lennoxville ( 1974 ) .

que l'influence de la répartition des débits n'a pas été évaluée.

Pour une tendance donnée, seule la concentration moyenne expérimentale a été considérée dans les simulations, c'est-à-dire que la variation d'échelle permettant de représenter les différents niveaux de concentrations observables n'est pas étudiée; la précision des débits massiques est inchangée par un facteur multiplicatif constant des concentrations ou des débits.

La comparaison des débits massiques se fait sur une base annuelle seulement, d'où la détermination d'une tendance de base annuelle et non saisonnière pour représenter l'évolution des concentrations.

Le pas de temps minimum considéré est journalier, ce qui suppose que les fluctuations horaires des concentrations et des débits sont minimes et n'ont pas d'influence sur le débit massique. Si la variabilité journalière était importante, la méthodologie que nous proposons pourrait éventuellement être transposée avec des pas de temps horaires.

### 2.2.3 Hypothèses des simulations

Le modèle de simulation choisi, soit la représentation du profil annuel des concentrations par un ensemble de deux droites auxquelles s'ajoutent des fluctuations aléatoires journalières, implique que les tendances identifiées n'ont pas d'évolution complexe et suivent une cyclicité annuelle, c'est-à-

dire que la concentration du 31 décembre est la même que celle du 1er janvier. Ce n'est pas nécessairement le cas pour deux années hydrologiques consécutives mais cette hypothèse facilite la mise en oeuvre des simulations.

Lors des simulations, l'augmentation de l'amplitude des fluctuations aléatoires peut conduire à des valeurs négatives de concentrations qui, n'ayant pas de signification physique, ne doivent pas entrer dans les calculs. C'est le cas pour des fluctuations négatives plus importantes que des concentrations de tendance. Pour éviter cette difficulté, toute valeur négative des concentrations est remplacée par zéro. Un maximum de 10% de telles valeurs a été accepté afin que les hypothèses de normalité soient approximativement respectées. Ces concentrations nulles peuvent correspondre aux valeurs traces, inférieures aux limites de détection, qui sont fréquentes en crue de printemps.

#### 2.2.4 Procédure

Les opérations permettant la simulation des concentrations, les calculs et la comparaison des débits massiques sont décrites brièvement; la programmation correspondante est donnée en annexe dans le programme SIMUL. Pour chacune des tendances étudiées, il s'agit de:

- a) générer, par interpolation une série de 365 concentrations

de moyenne  $\bar{x}$  en utilisant les équations des droites qui donnent la tendance;

- b) générer une série de 365 fluctuations journalières aléatoires de moyenne zéro et d'amplitude  $\sigma$

la sous-routine GENER du programme SIMUL est utilisée; elle produit des fluctuations pseudo-aléatoires suffisantes pour qu'il n'y ait pas de relation entre les valeurs successives (auto corrélation nulle); une nouvelle série est créée à chaque simulation;

- c) ajouter à chaque concentration journalière la fluctuation aléatoire correspondante;

- d) calculer les caractéristiques statistiques de la série synthétique obtenue:

$$\text{la moyenne } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{l'écart type } \sigma_c = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{et le coefficient de variation } Cv_c = \sigma_c / \bar{x}$$

où  $n = 365$  jours

- e) calculer et imprimer les caractéristiques statistiques de la série des 365 débits journaliers:

$$\text{la moyenne } \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

$$\text{l'écart type } \sigma_q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}$$

où  $n = 365$  jours

et le coefficient de variation  $Cv_q = \sigma_q / \bar{q}$

- f) associer la série synthétique de concentrations et la série de débits selon le calcul journalier pour calculer le débit massique de référence  $L_0$ ;
- g) calculer le débit massique annuel selon chacune des méthodes retenues décrites à la section 1.4 (c'est-à-dire par les formules 1, 2 et 3 respectivement) en effectuant des tirages dans la série synthétique de concentrations en fonction des pas de temps choisis.

les sept pas de temps suivants sont utilisés:

3, 5, 7, 11, 15, 21 et 31 jours; ils sont im-

pairs pour que la date d'échantillonnage corresponde effectivement au jour milieu de la période et suffisamment nombreux pour être en mesure de tracer des courbes d'erreur des débits massiques en fonction du pas de temps;

- . l'échantillonnage est systématique et équidistant;
- . le jour d'échantillonnage correspondant à la valeur retenue est au milieu de la période;
- . la première période débute le 1er janvier ce qui fixe le premier jour d'échantillonnage (premier tirage) au jour  $(t+1) / 2$  d'une période comportant un nombre impair de  $t$  jours;
- . le fait de fixer les jours d'échantillonnage peut créer des singularités dans les résultats;
- . tous les détails du mode de tirage des concentrations, d'indication des jours et des périodes sont présentés en annexe dans le programme SIMUL.

h) comparer successivement le débit massique de référence  $L_0$  à chacun des débits massiques  $L_c$  calculés pour l'une ou

l'autre des méthodes par la formule 
$$e = \left( \frac{L_c - L_0}{L_0} \right) \cdot 100$$

pour chacun des pas de temps retenus.

- Le résultat  $e$  est l'erreur relative qui définit la précision de la méthode pour un pas de temps donné; ce résultat varie en sens inverse de l'efficacité des méthodes de calcul des débits massiques;
  - à une sous-estimation du débit massique annuelle correspond une valeur négative de  $e$  et inversement, une sur-estimation conduit à une valeur positive; cependant, les résultats de chaque simulation ne sont pas imprimés.
- i) garder en mémoire le résultat de cette simulation pour chaque méthode et chaque pas de temps;
- j) répéter  $N$  fois les opérations précédentes sauf la première (a) et celle relative aux débits (e),  $N$  étant le nombre de simulations:
- le nombre de simulations  $N$  est fixé à 100, nombre à partir duquel les résultats se stabilisent; il est déterminé de façon à ce que l'imprécision due au fait qu'il y ait un nombre

fini de simulations soit inférieure à celle due aux autres facteurs (écart type, débits, concentrations, période, méthode).

- k) pour les  $N$  séries synthétiques générées, calculer et imprimer:

$$\text{la concentration moyenne } \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{x}_n$$

$$\text{l'écart type moyen des concentrations } \bar{\sigma}_c = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma_{c_n}$$

le coefficient de variation moyen des concentrations

$$\bar{Cv}_c = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Cv_{c_n}$$

ces caractéristiques statistiques ajoutées à celles des débits permettent une représentation graphique des résultats.

- l) pour les  $N$  résultats de chacune des méthodes et pour chaque pas de temps utilisé, calculer et imprimer:

l'erreur relative moyenne en valeur absolue

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{L_{c_n} - L_{0_n}}{L_{0_n}} \right| 100 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| e_n \right|$$

l'écart type des erreurs relatives  $\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (e_n - E)^2}$

et la précision du résultat  $E = \sigma_E / \sqrt{N}$

- pour  $N = 100$ , l'erreur type ou la précision de  $E$  est égale à  $.1 \sigma_E$  et est de l'ordre de 10%;
- $\sigma / \sqrt{N}$  représente l'erreur type d'une population normale; la normalité des séries de 100 résultats a été vérifiée par l'étude du coefficient d'asymétrie  $C_s$  pour tous les cas généraux. Le coefficient d'asymétrie n'est pas significativement différent de zéro (au niveau 5%) sauf pour quelques simulations au niveau 1%. Il s'exprime par:

$$C_s = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}^{3/2} = \frac{\mu_3}{(\mu_2)^{3/2}}$$

Ces caractéristiques statistiques des résultats (moyenne et écart type des erreurs relatives, erreur type) sont avec celles des concentrations et des débits, les informations que nous obtenons pour une tendance de base et une amplitude des fluctuations aléatoires  $\sigma$  (incluant  $\sigma = 0$ ). Une fois les  $N$  simulations terminées, les opérations sont reprises (sauf la première aussi longtemps que la tendance étudiée est la même) pour toute une gamme d'amplitude de fluctuations aléatoires  $\sigma$ . Les amplitudes  $\sigma = .1 \bar{X}$ ,  $.2 \bar{X}$ ,  $.3 \bar{X}$ , ..... et  $.8 \bar{X}$  sont simulées ( $\bar{X}$  est la concentration moyenne); les plus grandes fluctuations donnent lieu à plus de 10% de valeurs négatives des concentrations et ne sont pas considérées. Puis, la procédure complète est répétée pour une nouvelle tendance de base. La figure 2 illustre les étapes de cette procédure du programme SIMUL annexé.

### 2.3 Applications du modèle

La dernière étape méthodologique est l'application du modèle de simulation à un nombre restreint mais suffisant de cas suivant la procédure précédemment décrite. Le modèle de simulation choisi est appliqué, d'une part, à des comportements observés à Lennoxville qui peuvent cependant représenter tout paramètre ayant un comportement analogue à toute station où les débits liquides sont comparables, et d'autre part, à des cas types correspondant à une généralisation du modèle choisi.

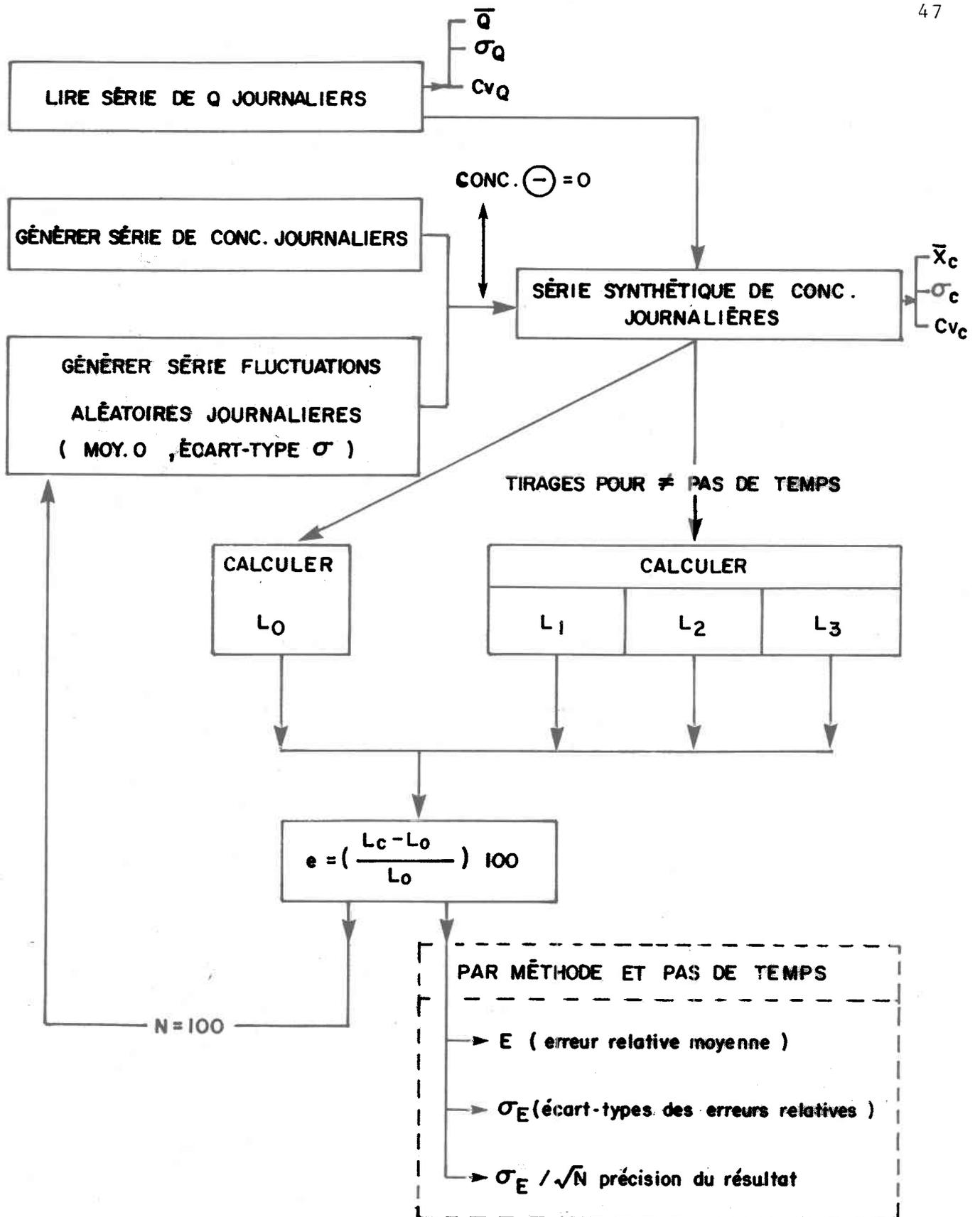


Figure 2 . Schéma de la procédure des simulations .

### 2.3.1 Applications à Lennoxville

Pour chacun des paramètres suivants: calcium, sulfates, chlorures, fer, magnésium, silice, nitrates, azote total et phosphore total retenus à Lennoxville, une tendance de base est ajustée aux concentrations observées; les exemples du fer et des sulfates sont donnés à la figure 3; chaque tendance a ses caractéristiques propres (moyenne, écart type, pentes des droites, coordonnées des intersections) et peut être identifiée à l'une des trois catégories de tendances suivantes qui représentent l'ensemble des comportements observés soient

- deux (2) droites situant le minimum au printemps (en crue) et le maximum en été (en étiage); c'est le cas des paramètres calcium, sulfates, fer et chlorures;
- deux (2) droites situant le maximum au printemps (en crue) et le minimum à l'été (en étiage), représentant la silice, l'azote total et les nitrates;
- ou une (1) droite horizontale correspondant à une valeur constante de la concentration durant toute l'année, ce qui est le cas pour le magnésium et le phosphore total.

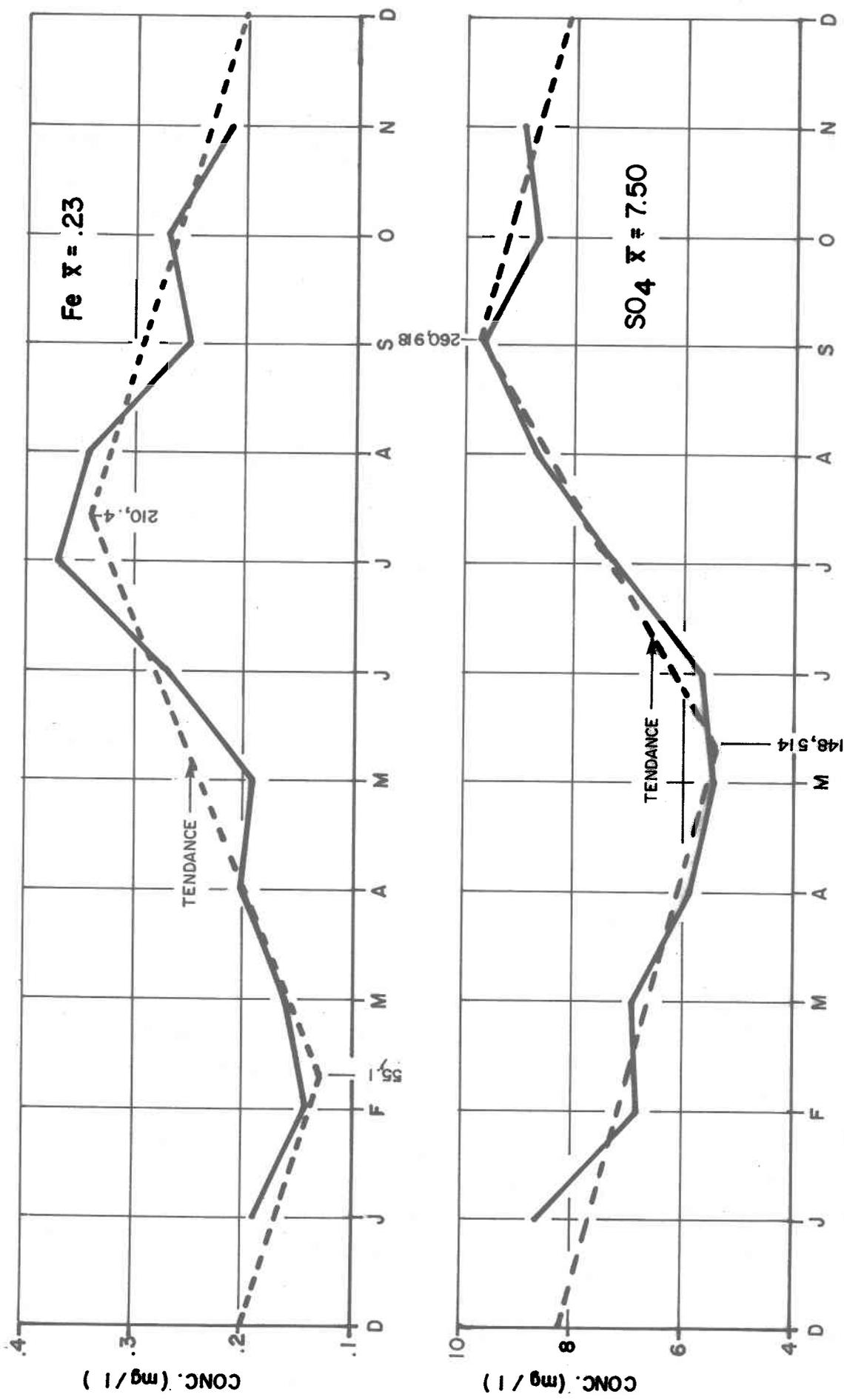


Figure 3 . Tendence de base tracée sur le profil de variabilité temporelle .

Le tableau 2 présente les caractéristiques de chacun des huit (8) paramètres étudiés; le phosphore total, ayant comme le magnésium une tendance de base annuelle à peu près constante, il a été éliminé. Pour chaque tendance, les simulations sont faites d'une part, avec la tendance seule ( $\sigma = 0$ ) pour mettre en évidence l'effet de l'addition de variables aléatoires à la tendance générale et d'autre part, avec des fluctuations d'amplitude  $\sigma$  variant de  $.1 \bar{X}$  à  $.8 \bar{X}$ . Les valeurs réelles des écarts types des paramètres étudiés ne sont pas simulées car elles sont, sauf pour les nitrates, inférieures à  $.3 \bar{X}$ ; il est par conséquent facile de les situer, s'il y a lieu, dans la série de résultats.

Les résultats obtenus pour ces huit (8) paramètres pourraient être transposés puisque les tendances générales étudiées se retrouvent fréquemment à d'autres stations et pour d'autres paramètres. De plus, la série d'écarts types simulés donne lieu à une gamme de coefficients de variation couvrant la plupart des cas et les débits utilisés sont représentatifs de ceux du Québec. Cependant, la comparaison des tendances de base elles-mêmes, à partir de ces cas particuliers, est plus délicate; pour rendre plus accessible le type d'information obtenu à Lennoxville, des cas généraux sont envisagés.

### 2.3.2 Généralisation

Les cas types sont hypothétiques mais conformes à la

Tendance de base	Paramètre	$\bar{X}$	$\sigma$	Coordonnées des intersections			
		mg/l		$X_1$ , $y_1$	$X_2$ , $y_2$		
une droite horizontale	$Mg^{+2}$	2.9	.5	—		—	
2 droites situant le minimum en crue	$Ca^{+2}$	10.9	1.8	147, 8.9		185, 13.2	
	$SO_4^{-2}$	7.5	1.5	148, 5.4		260, 9.8	
	$Cl^{-1}$	2.8	0.4	95, 3.2		137, 2.4	
	$Fe^{+3}$	0.3	0.1	55, 0.1		210, 0.4	
2 droites situant le minimum en étiage	$SiO_2$	4.2	0.8	17, 5.4		219, 3.1	
	$N_{tot.}$	0.5	0.1	93, 0.6		190, 0.3	
	$NO_3^{-}$	0.2	0.1	75, 0.4		220, 0.03	

$\bar{X}$ : moyenne des concentrations mesurées à Lennoxville

$\sigma$ : écart type des concentrations

**Tableau 2:** Caractéristiques des tendances de base des huit paramètres étudiés à Lennoxville.

réalité et établis à partir des observations à Lennoxville ou ailleurs; ils sont cependant traités avec une seule série de débits (ceux de Lennoxville), ce qui restreint leur utilisation.

L'établissement des tendances de base des cas types s'inspirant des comportements observés est le suivant: à partir de la série de débits, on détermine approximativement les dates de la crue et de l'étiage, puis on fait un ajustement de quelques couples de droites en s'imposant comme contraintes que les maxima et minima se situent toujours aux dates de crue et d'étiage, séparées d'environ six mois pour la série utilisée, et que la surface sous la courbe est constante, c'est-à-dire que la concentration moyenne de chacune des tendances ainsi tracées est la même, soit  $10 \text{ mg}/\ell$ ; ainsi, pour la gamme des cinq tendances étudiées, la concentration à l'un des points d'intersection des deux droites passe d'un maxima à un minima pendant que celle de l'autre point d'intersection varie de façon inverse; la tendance médiane de la série est une droite horizontale. La figure 4 illustre les tendances de base servant à la généralisation.

Les coordonnées  $(x, y)$  des points d'intersections des deux droites pour les cinq cas types étudiés sont présentés au tableau 3 où les points 1 et 2 caractérisent respectivement les jours de crue et d'étiage,  $x$  identifie le jour et  $y$  la concentration à ce jour.

Dans chaque cas, les variations des facteurs considérés dans la procédure des simulations sont les mêmes que pour les paramètres étudiés à Lennoxville. Le but de cette générali-

sation est de déceler l'influence que peuvent avoir des comportements différents et même inverses sur les débits massiques.

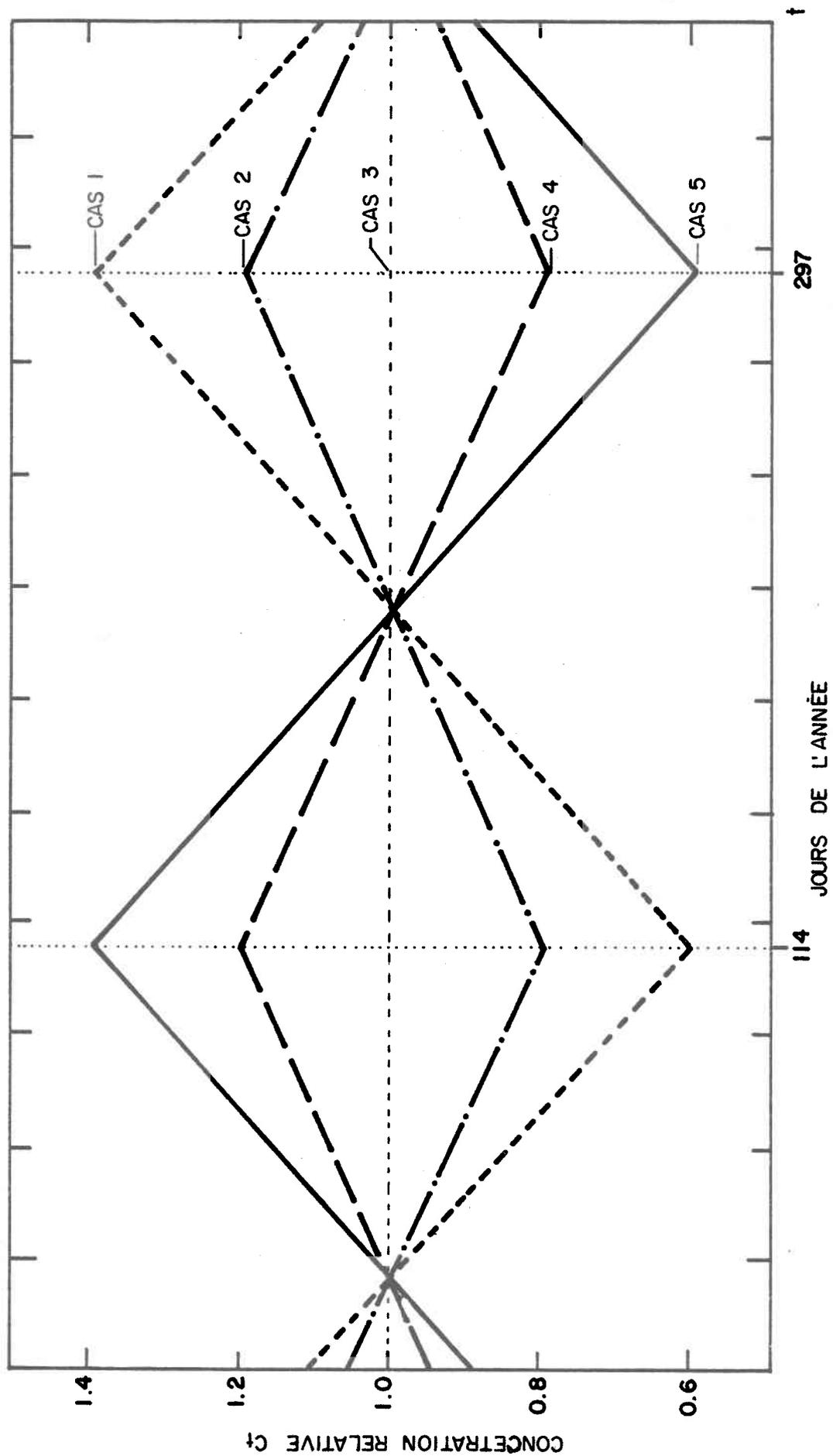


Figure 4 . Représentation des tendances de base des 5 cas types .

coordonnées des intersections  cas types	crue		étiage	
	$x_1$ jour,	$y_1$ mg/l	$x_2$ jour,	$y_2$ mg/l
1	114	6	297	14
2	114	8	297	12
3	114	10	297	10
4	114	12	297	8
5	114	14	297	6

Tableau 3: Coordonnées des intersections des droites pour chacun des cinq cas types.

### 3. SYNTHESE DES RESULTATS

Pour chacun des cas étudiés, les résultats obtenus lors des simulations ont été mis en graphique; leur analyse a permis de mettre en évidence les points suivants.

#### 3.1 Simulations à Lennoxville

##### 3.1.1 Influence du débit sur la précision des méthodes

Les courbes des valeurs absolues des erreurs relatives moyennes en fonction du pas de temps traduisent un écart important entre les débits massiques calculés par la méthode 1 (formule 1) et le débit massique de référence  $L_0$  pour un pas de temps de 21 jours, pour les huit paramètres étudiés à Lennoxville; cette singularité, dont un exemple est montré à la figure 5, correspond à une forte sous-estimation des débits massiques qui s'atténue avec l'augmentation de l'amplitude des fluctuations aléatoires.

Cette sous-estimation est une conséquence, d'une part, de la méthode 1 elle-même qui utilise le débit du jour d'échantillonnage et le considère constant pendant la période, et d'au-

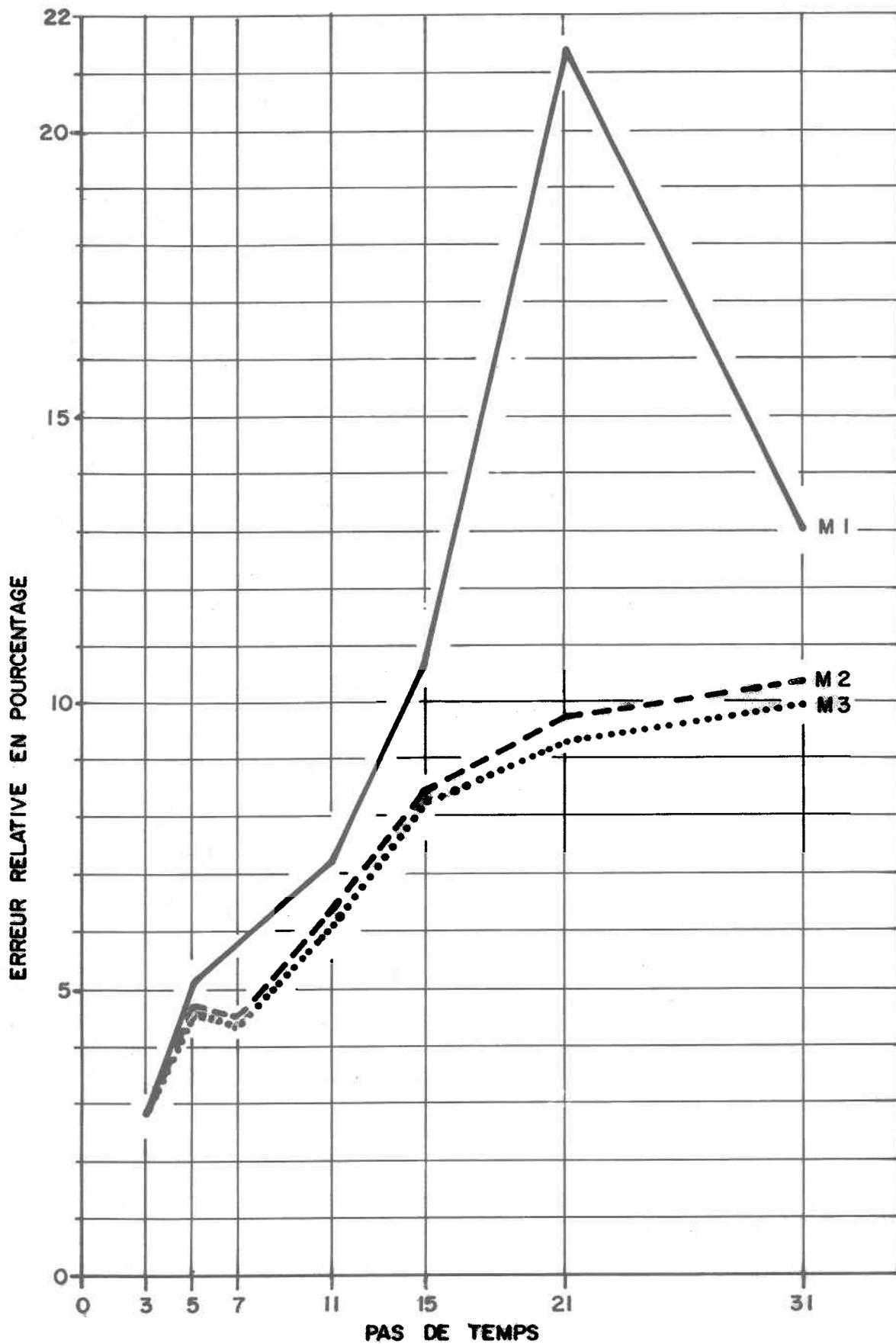


Figure 5 .Précision des 3 méthodes de calcul (cas de la silice,  $\sigma = 0.4\bar{x}$  ).

tre part, est due au fait que le jour d'échantillonnage est toujours le même pour tous les tirages.

Si, comme cela semble être le cas avec les débits liquides utilisés, le pas de temps correspond à la durée de la crue, les jours d'échantillonnage fixés par le mode de tirage utilisé se situent de part et d'autre du maximum et aucun des débits de crue n'est impliqué dans les calculs par la méthode 1, d'où la brusque variation des résultats observés pour un pas de temps de 21 jours (qui ne prend pas en compte la crue), quelque soit la tendance de base considérée.

Pour vérifier si ce comportement est effectivement lié à la forme de l'hydrogramme, nous avons décalé la date d'échantillonnage; plus précisément, nous avons avancé de +5 jours puis reculé de -5 jours la série de débits; le biais introduit en ne faisant plus correspondre à la concentration du jour d'échantillonnage le débit du même jour est minime puisque la variation des concentrations est, en général, beaucoup plus faible que celle des débits; de plus, l'événement hydrologique en cause est d'une durée supérieure à 5 jours. Cela monte l'importance du pas de temps si l'on veut ne pas manquer des épisodes hydrologiques.

Le décalage des débits de -5 jours n'a pas d'effet sur la méthode 1 alors que le décalage +5 jours en régularise le comportement, faisant disparaître le maximum à 21 jours (voir figure 6); cet effet de "largeur d'échantillonnage" est bien relié au profil des débits particuliers utilisés et à la métho-

de 1. Celle-ci est donc à éviter pour des pas de temps correspondant aux pics du spectre d'analyse des fréquences des débits.

Les méthodes 2 et 3 (formules 2 et 3 respectivement) ne sont pas affectées par le décalage des débits de +5 jours; alors pour comparer les trois méthodes de calcul en fonction du pas de temps, nous utilisons uniquement les résultats obtenus avec la série décalée des débits.

### 3.1.2 Efficacité des méthodes en fonction du pas de temps

Tel que prévu, les courbes des erreurs relatives moyennes en fonction du pas de temps indiquent pour les huit paramètres, que l'efficacité des trois méthodes est réduite par l'augmentation du pas de temps, ce qui signifie que la précision des débits massiques diminue avec la diminution de la fréquence d'échantillonnage (voir figures 5 et 6). Les résultats sont relativement bons; dans l'ensemble, ils varient de 0 à 21% lorsque l'amplitude des fluctuations aléatoires devient assez importante (supérieure à  $.6 \bar{X}$ ).

### 3.1.3 Comparaison des trois méthodes de calculs des débits massiques

Dans l'ensemble, la méthode 1 est nettement moins bonne que les deux autres (voir figure 6); pour tous les paramètres,

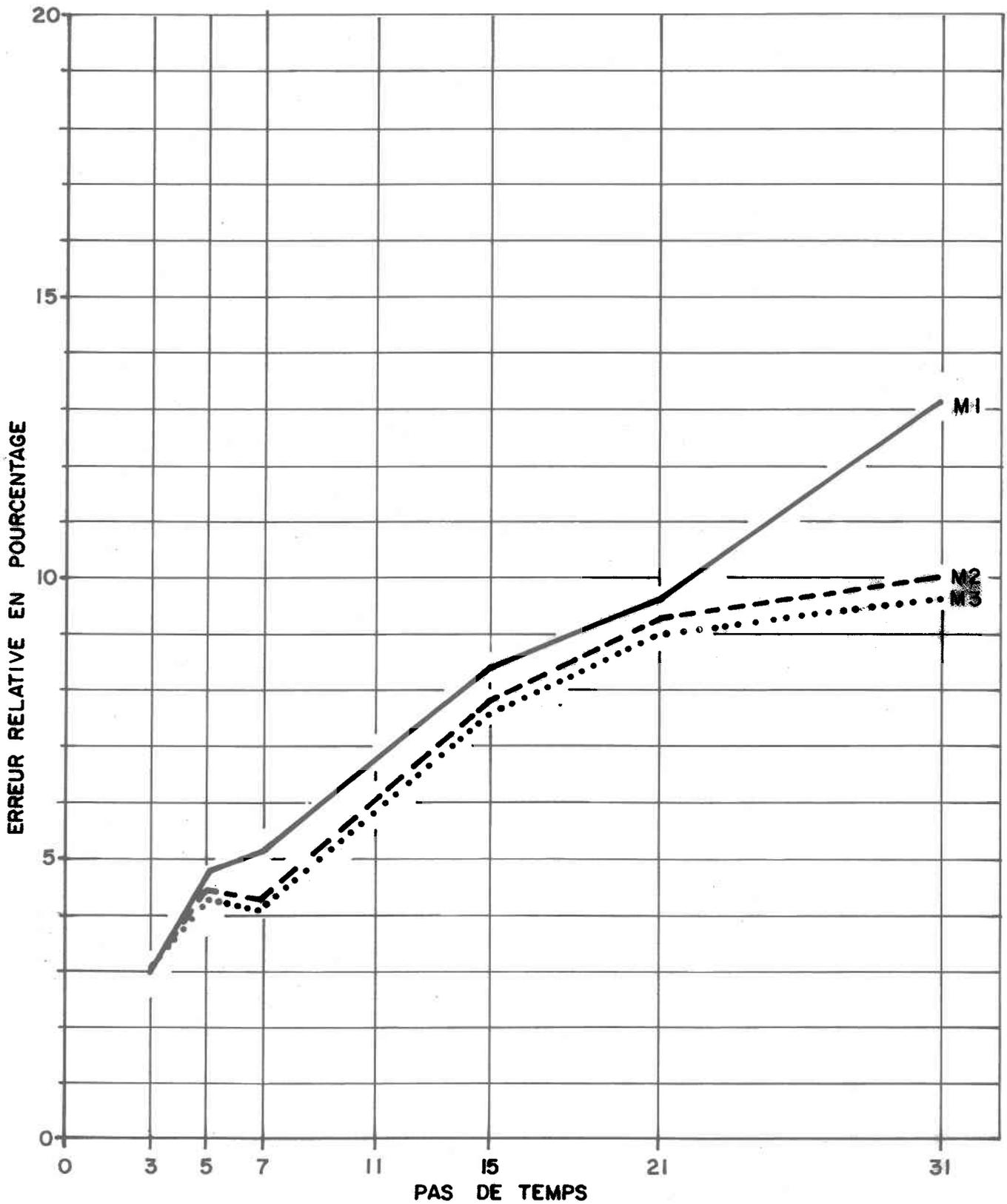


Figure 6 . Précision des 3 méthodes de calcul après décalage des débits de 5 jours ( cas de la silice ,  $\sigma = 0.4 \bar{x}$  ) .

la différence entre la méthode 1, d'une part, et les méthodes 2 et 3, d'autre part, est maximale pour la tendance seule ( $\sigma=0$ ); l'erreur relative moyenne varie alors de 0 à 10% pour la première et est nulle pour les autres. A mesure que l'amplitude des fluctuations aléatoires augmente, cette différence s'atténue; pour une amplitude supérieure à  $.6 \bar{X}$  la méthode 1 se compare aux autres car l'effet des grandes fluctuations aléatoires vient pondérer la faiblesse de cette méthode.

Quel que soit le paramètre étudié, les trois méthodes donnent un débit massique de même précision pour un pas de temps de trois jours.

La méthode 3 est légèrement meilleure que la méthode 2; l'amélioration des résultats due à la méthode 3 apparaît pour des pas de temps supérieurs à 21 jours et avec l'augmentation de l'amplitude des fluctuations aléatoires. Lorsqu'aucune fluctuation aléatoire n'est ajoutée à la tendance, les erreurs relatives moyennes de ces deux méthodes sont inférieures à .5% quels que soient la tendance de base et le pas de temps; cet écart correspond à l'erreur introduite autour des deux discontinuités des tendances. Ainsi, pour des pas de temps inférieurs à 21 jours, les méthodes 2 et 3 peuvent être employées indifféremment.

#### 3.1.4 Effet de l'augmentation de l'amplitude des fluctuations aléatoires $\sigma$

Pour tous les paramètres, le passage de  $\sigma=0$  à  $\sigma = .8 \bar{X}$

c'est-à-dire l'augmentation du coefficient de variation ( $C_v$ ), se traduit par un redressement des courbes qui correspond à une augmentation des erreurs relatives moyennes et à une plus grande influence du pas de temps sur la précision des débits massiques. L'efficacité des trois méthodes est ainsi diminuée. Une représentation tridimensionnelle des erreurs relatives moyennes en fonction du pas de temps et de  $\sigma$  (figure 7), en plus de regrouper les observations précédentes, permet de visualiser cette forte influence de l'amplitude des fluctuations sur la précision des débits massiques. Il faut noter que la précision des résultats, évaluée par  $\sigma_E/\sqrt{N}$ , augmente proportionnellement à  $\sigma$ .

### 3.1.5 Influence de la tendance

Pour les huit tendances simulées à partir des concentrations observées à Lennoxville, les courbes des erreurs  $\bar{E}$  en fonction du pas de temps ont la même allure pour une amplitude et une méthode donnée et les valeurs numériques de  $\bar{E}$  sont similaires. Dans ces cas particuliers, la tendance n'a donc pas d'influence prédominante. Il est assez étonnant de constater que la position du minimum de la tendance, qui varie d'un paramètre à l'autre, ait si peu d'influence sur la précision des débits massiques.

Ces observations mettent en évidence que la précision d'une méthode est plus fonction des fluctuations des concentrations autour de la tendance que de la tendance elle-même et

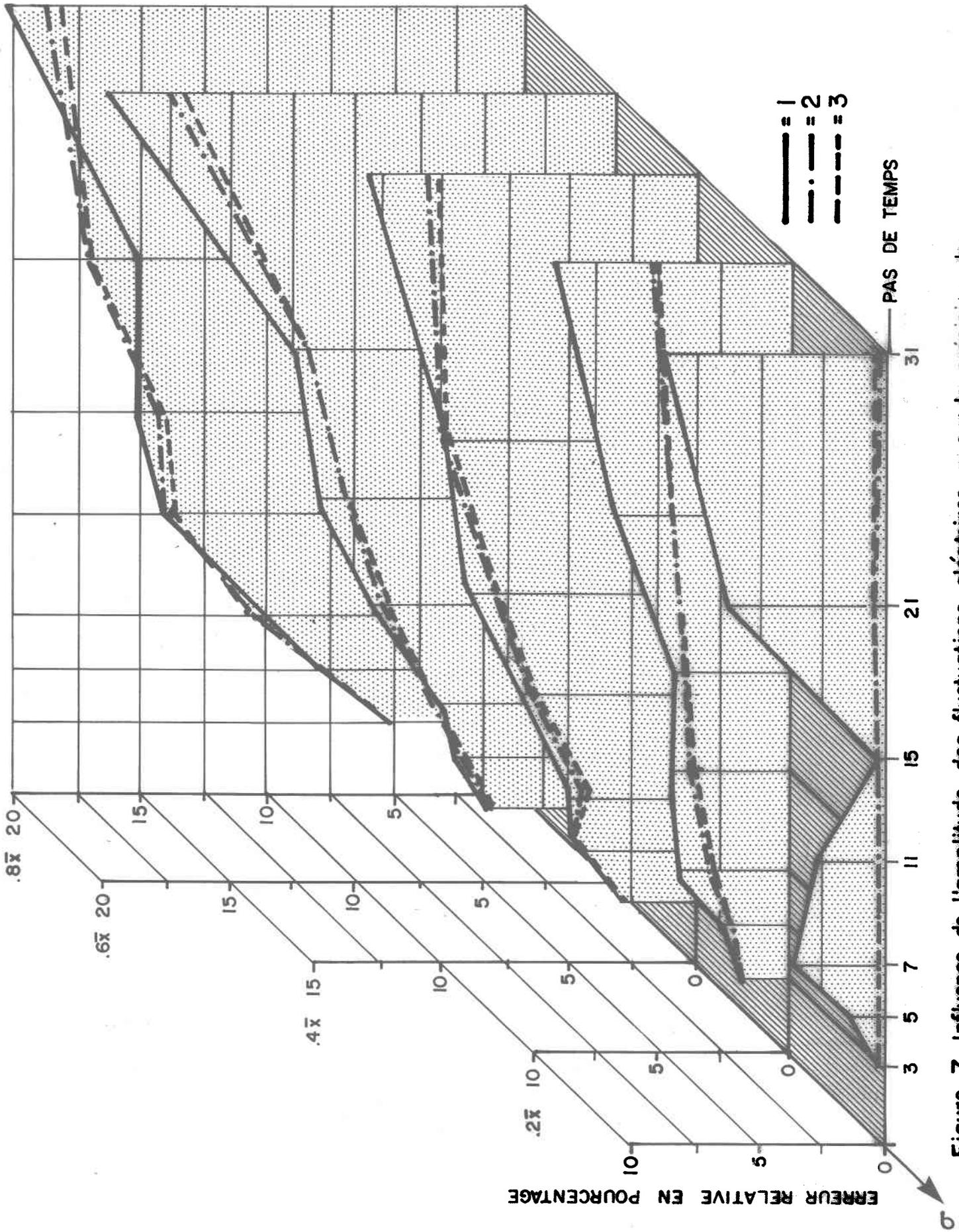


Figure 7. Influence de l'amplitude des fluctuations aléatoires  $\sigma$  sur la précision des méthodes ( cas des sulfates ) .

qu'elle est davantage fonction du débit puisque des tendances montrant des minimum ou maximum en crue ou des concentrations constantes n'induisent pas de variations sensibles des résultats. C'est d'ailleurs la raison du comportement similaire des méthodes 2 et 3.

### 3.1.6 Courbes des erreurs relatives moyennes en fonction du coefficient de variation

L'information précédente peut être représentée de façon plus pratique en portant en ordonnée les coefficients de variations des séries de concentrations ( $Cv_c$ ) (regroupés dans le tableau 4) et en abscisse, les erreurs relatives moyennes pour une tendance et une méthode donnée. Cette représentation donne lieu à une famille de courbes, chacune correspondant à une fréquence d'échantillonnage particulière. Elle permet de situer le coefficient de variation des concentrations de Lennoxville par rapport à la gamme de coefficients de variation simulés. Un exemple, pour un paramètre et une méthode de calcul, est donné à la figure 8.

L'influence du pas de temps sur la précision des débits massiques ressort nettement malgré la diversité des cas étudiés, la localisation variable des extrêma des tendances et l'ordre de grandeur très variable des concentrations des paramètres.

Paramètre $\sigma$	Ca <sup>+2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Fe <sup>+3</sup>	Cl <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub>	N <sub>tot.</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg <sup>+2</sup>
.1 $\bar{X}$	.16	.20	.29	.14	.19	.21	.50	.11
.2 $\bar{X}$	.23	.26	.33	.22	.25	.26	.52	.20
.3 $\bar{X}$	.32	.34	.40	.31	.34	.34	.56	.30
.4 $\bar{X}$	.41	.43	.47	.41	.43	.43	.60	.40
.5 $\bar{X}$	.50	.51	.54	.49	.51	.51	.64	.49
.6 $\bar{X}$	.58	.59	.61	.57	.58	.59	.68	.57
.7 $\bar{X}$	.64	.65	.67	.64	.65	.65	.73	.64
.8 $\bar{X}$	.71	.71	.73	.71	.71	.71	.78	.70

$\sigma$ : est l'amplitude des fluctuations aléatoires

$\bar{X}$ : est la concentration moyenne

Tableau 4 : Coefficients de variations des séries de concentrations simulées pour les huit paramètres étudiées à Lennoxville.

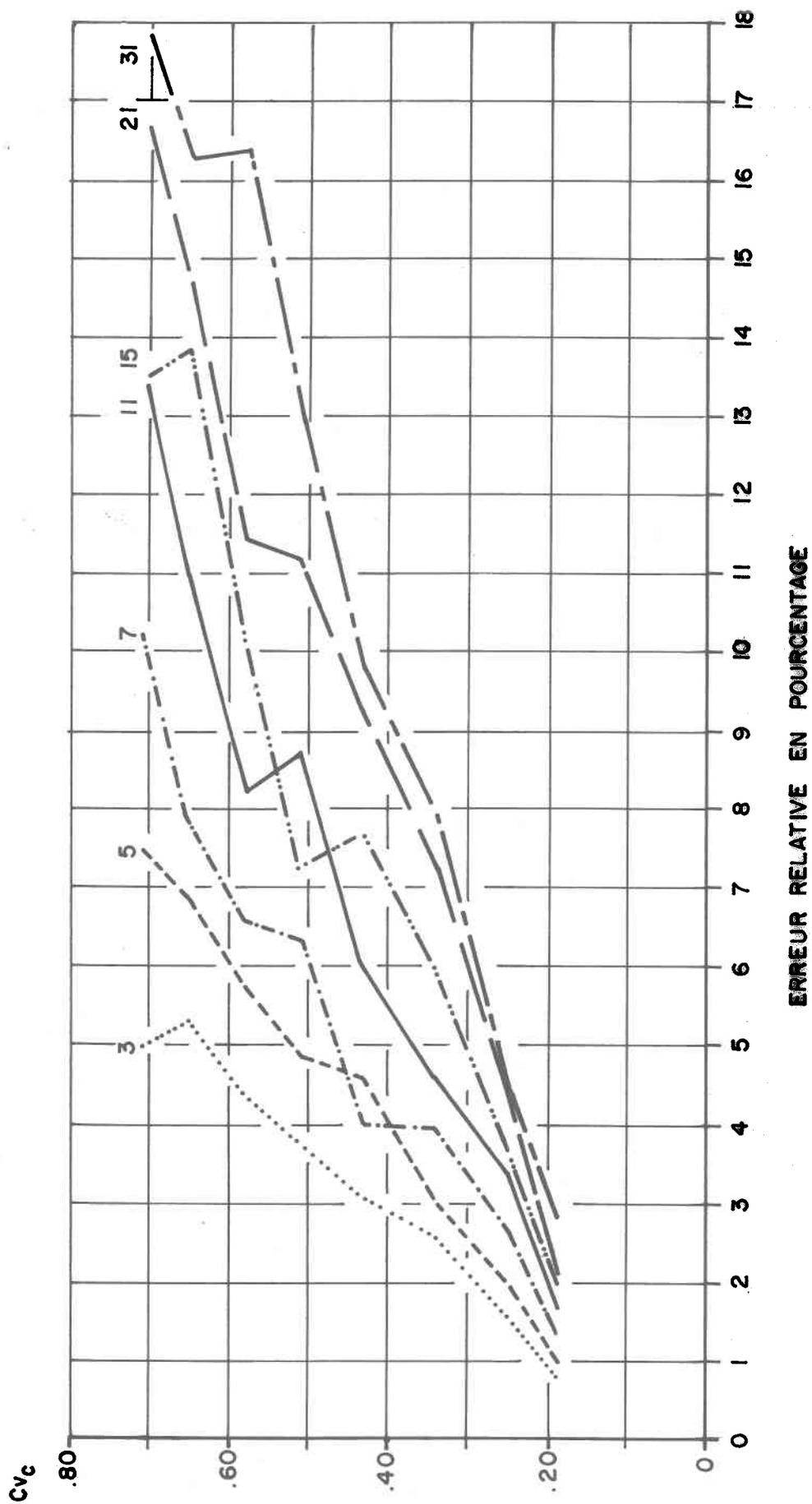


Figure 8 . Relation entre le coefficient de variation des concentrations  $C_{vc}$  et l'erreur relative pour les 7 pas de temps étudiés ( cas de la silice , méthode 3 ) .

### 3.2 Simulations généralisées

Comme dans le cas des simulations à Lennoxville, seuls les résultats obtenus avec un décalage des débits liquides de +5 jours sont interprétés pour les simulations généralisées. La même représentation graphique a également été retenue.

#### 3.2.1 Résultats généraux déjà mis en évidence

La simulation des cas types donne lieu, sauf pour l'influence de la tendance, aux mêmes constatations que pour les paramètres étudiés à Lennoxville. Ces résultats généraux se résument brièvement

- la précision des trois méthodes diminue avec l'augmentation du pas de temps;
- la méthode 1 est nettement moins bonne que les deux autres sauf pour un grand coefficient de variation et un pas de temps inférieur à 21 jours;
- la méthode 3 est sensiblement meilleure que la méthode 2 pour un pas de temps supérieur à 21 jours;
- l'augmentation de  $\sigma$  diminue l'efficacité des trois méthodes et s'accompagne d'une diminution de précision,  $\sigma_E / \sqrt{N}$ , des résultats;

pour la tendance seule ( $\sigma = 0$ ), l'erreur relative moyenne des débits massiques, qui en définit la précision, est toujours inférieure à .5% si les méthodes 2 ou 3 servent aux calculs; il s'agit de l'erreur liée aux concentrations.

### 3.2.2 Influence de la tendance

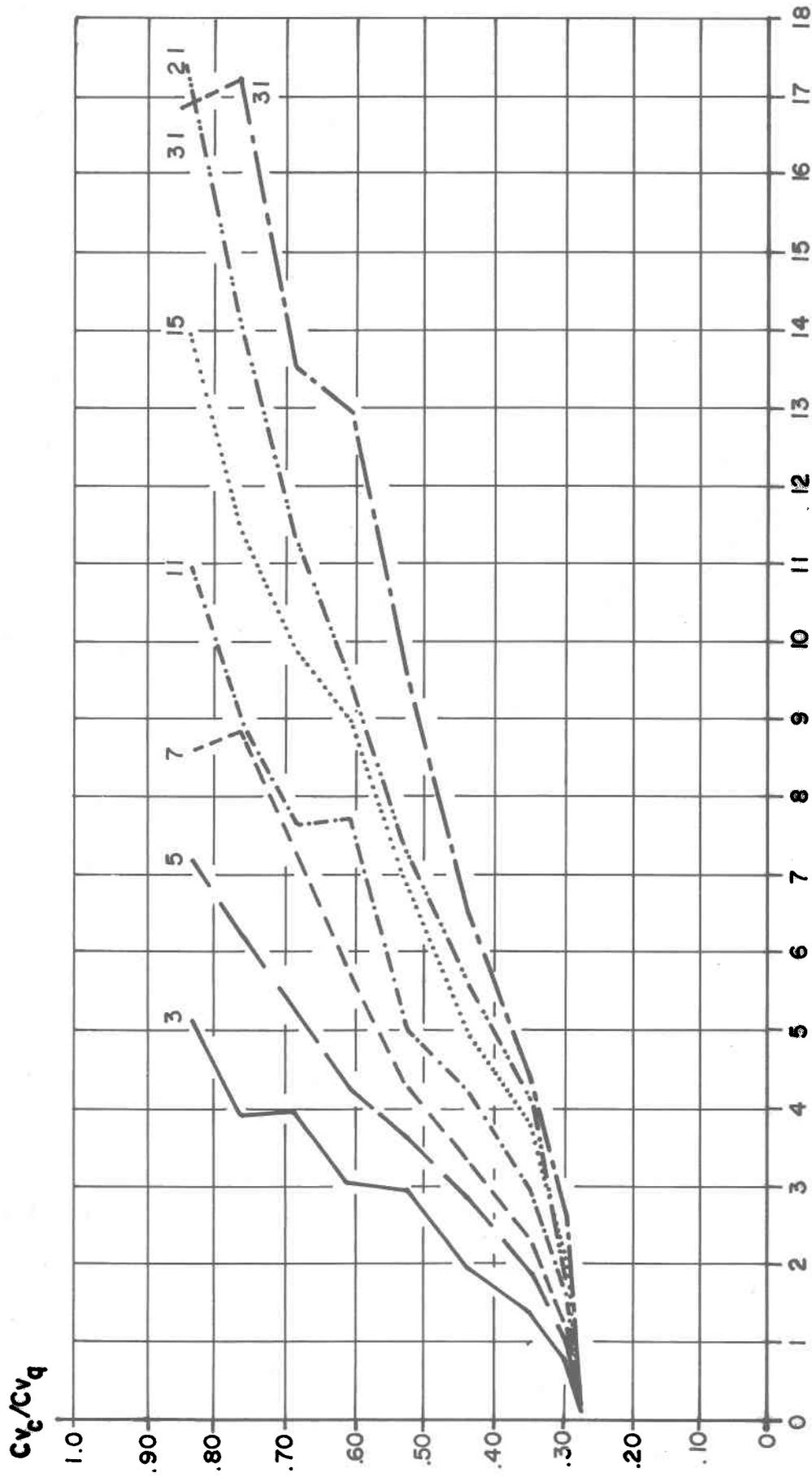
Cette influence est étudiée à partir des courbes des erreurs relatives moyennes  $\bar{E}$  en fonction des rapports des coefficients de variation des concentrations et débits ( $Cv_c/Cv_q$ ). Ceux-ci sont indiqués au tableau 5. Seuls les résultats de la méthode 3 sont mis en graphique puisque la méthode 1 est à éviter et que la méthode 2 se comporte comme la méthode 3 pour des pas de temps inférieurs à 21 jours, cette dernière étant préférable pour de plus grands pas de temps.

Pour chacun des cinq cas types, nous obtenons une famille de courbes, chacune correspondant à un pas de temps; l'irrégularité de certaines courbes (pour des pas de temps de 7 et 15 jours surtout) est liée à l'hydrogramme particulier des débits utilisés pour les calculs. Les cinq familles de courbes sont similaires; un seul exemple en est donné à la figure 9. Cependant, un tableau des erreurs relatives moyennes des débits massiques, c'est-à-dire la mesure de la précision de la méthode pour les coefficients de variation et les pas de temps étudiés, est présentée en annexe.

cas \ $\sigma$	1	2	3	4	5
0	.27	.14	0	.14	.27
.1 $\bar{X}$	.29	.19	.13	.19	.30
.2 $\bar{X}$	.35	.27	.25	.27	.35
.3 $\bar{X}$	.45	.38	.35	.38	.45
.4 $\bar{X}$	.53	.48	.47	.48	.54
.5 $\bar{X}$	.62	.59	.58	.59	.62
.6 $\bar{X}$	.70	.68	.67	.67	.70
.7 $\bar{X}$	.78	.76	.75	.76	.79
.8 $\bar{X}$	.85	.84	.82	.84	.86

- . Le coefficient de variation des débits utilisés est .85
- . La concentration moyenne  $\bar{X}$  est constante,  $\bar{X} = 10 \text{ mg/l}$
- .  $\sigma$  est l'amplitude des fluctuations aléatoires

Tableau 5: Rapport des coefficients de variation des concentrations et des débits ( $Cv_c/Cv_q$ ) pour les cinq cas types étudiés.



ERREUR RELATIVE EN POURCENTAGE

Figure 9 . Relation entre le rapport  $Cv_c/Cv_q$  et l'erreur relative pour les 7 pas de temps étudiés ( cas 5 , méthode 3 ).

Compte tenu de la précision des résultats  $\sigma_E/\sqrt{N}$  et des coefficients de variation, le lissage des courbes est acceptable. Les courbes lissées des erreurs relatives moyennes sont tracées sur les figures 10 à 14 pour les cinq cas étudiés; elles définissent la précision de la méthode 3 de calcul des débits massiques.

La comparaison des cinq familles de courbes lissées permet de mettre en évidence d'une part, un redressement des courbes, et d'autre part, une zone d'influence.

Redressement des courbes:

Le passage d'une tendance montrant un minimum en crue (et un maximum en étiage) à une tendance inverse c'est-à-dire ayant un maximum en crue (et un minimum en étiage) se traduit par un redressement des courbes qui correspond à une amélioration de la précision des débits massiques pour tous les pas de temps; on peut penser que le tirage d'une concentration déviant fortement de la tendance aura plus d'effet sur les résultats si cette concentration est associée à des débits d'étiage (cas 1) plutôt qu'à des débits de crue (cas 5).

Cependant, cette amélioration (dans le sens de diminution des erreurs relatives) pour les cas de maximum en crue est relativement faible si l'on considère que l'écart type et la moyenne des erreurs  $\bar{E}$  sont du même ordre de grandeur et que la précision des résultats estimée par  $\sigma_E/\sqrt{N}$  est de l'ordre de 10%; les cinq courbes d'une même fréquence d'échantillonnage peuvent

donc représenter une précision du même ordre de grandeur.

Cette faible influence de la tendance sur les résultats est liée à l'hypothèse de la précision des débits liquides journaliers et s'observe pour des rapports  $Cv_c/Cv_q$  supérieurs à .30.

Zone d'influence:

La zone de plus forte influence de la tendance correspond à des rapports  $Cv_c/Cv_q$  inférieurs à .3 pour les cas extrêmes (cas 5 et 1) et inférieurs à .20 pour les cas intermédiaires (cas 2 et 4).

Dans le cas de la droite (cas 3), les courbes des différentes fréquences d'échantillonnage passent par l'origine puisque les erreurs relatives sont toutes nulles pour la tendance seule; la variation des concentrations des jours de crue et d'étiage par rapport à la droite se traduit par une remontée de l'ordonnée à l'origine et un changement de courbure des courbes lissées qui correspond à l'augmentation du coefficient de variation de la tendance de base à mesure que les pentes des droites qui la forment augmentent.

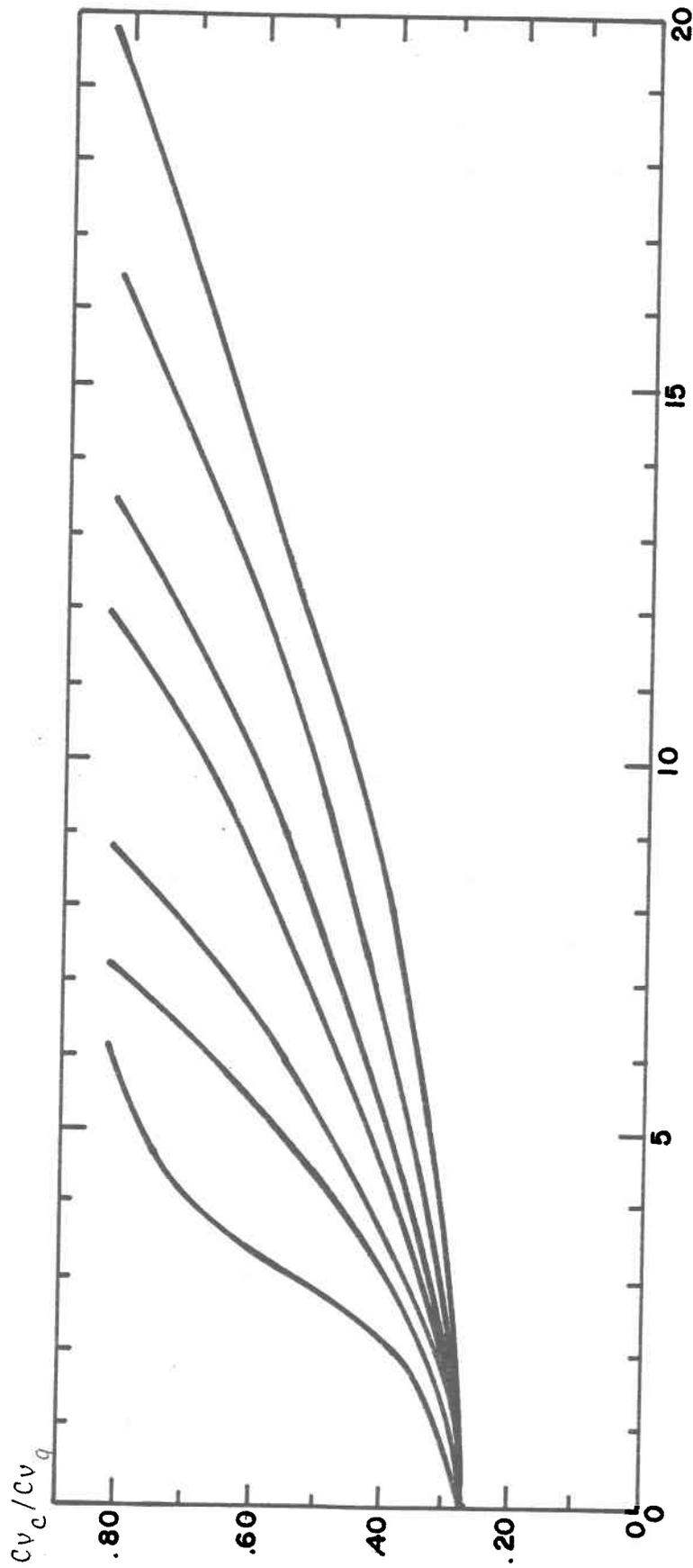
Dans cette zone d'influence, quel que soit le pas de temps, les erreurs relatives sont inférieures à 3%; la précision sur les débits liquides a alors plus d'importance sur les débits massiques que celle liée à l'utilisation des méthodes 2 ou 3.

A l'extérieur de cette zone, c'est-à-dire pour des rapports  $Cv_c/Cv_q$  supérieurs à .30 dans les cas extrêmes et à

.20 dans les cas intermédiaires, les erreurs relatives dépendent d'autant plus du pas de temps que le rapport  $Cv_c/Cv_q$  est élevé; ces erreurs sont de l'ordre de grandeur de la précision des débits; il est important, si on se situe dans cette zone, de tenir compte de l'incertitude liée à la méthode 3 en fonction de la fréquence d'échantillonnage.

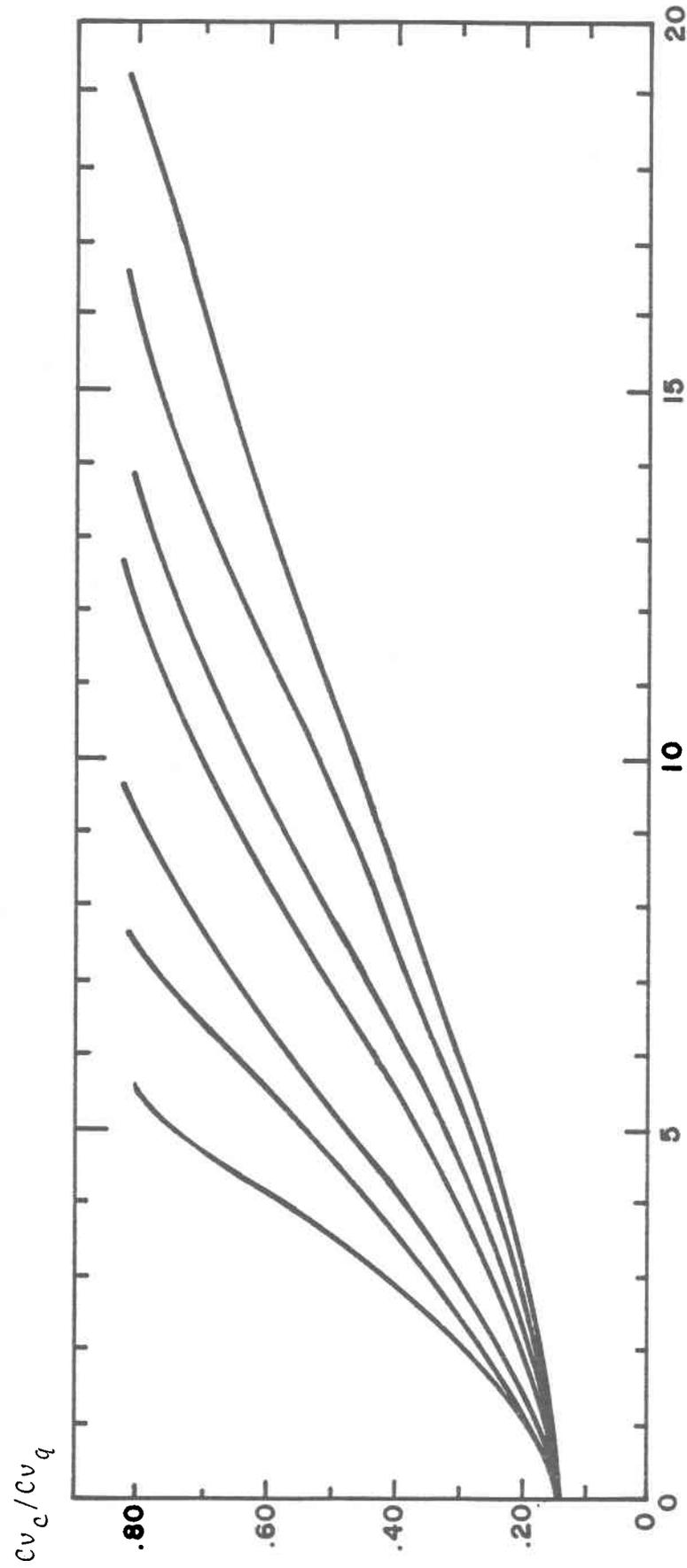
L'approche empirique de ce travail ne permet pas d'identifier nettement l'influence de chacune des tendances; elle permet cependant de constater que, pour une même variabilité  $Cv_c/Cv_q$ , les résultats sont meilleurs dans le cas d'une synchronisation des maxima des concentrations et des débits que dans les autres cas à cause probablement de la meilleure définition du débit massique en période de crue (période représentant un plus grand pourcentage du débit massique total); elle montre aussi que la variabilité des paramètres caractérisée par le rapport  $Cv_c/Cv_q$  a beaucoup plus d'influence sur les résultats que la tendance elle-même, sauf dans la zone d'influence où l'incertitude résultante est, en général, minime par rapport à l'imprécision des débits liquides.

Il est intéressant de noter que la méthode 3 dans laquelle on effectue une interpolation entre deux jours d'échantillonnage, donne lieu à une sous-estimation des débits massiques dans le cas d'une tendance synchronisée avec les débits et à une faible sur-estimation dans le cas contraire; ceci provient de ce que le coefficient de variation des débits est supérieur à celui des concentrations.



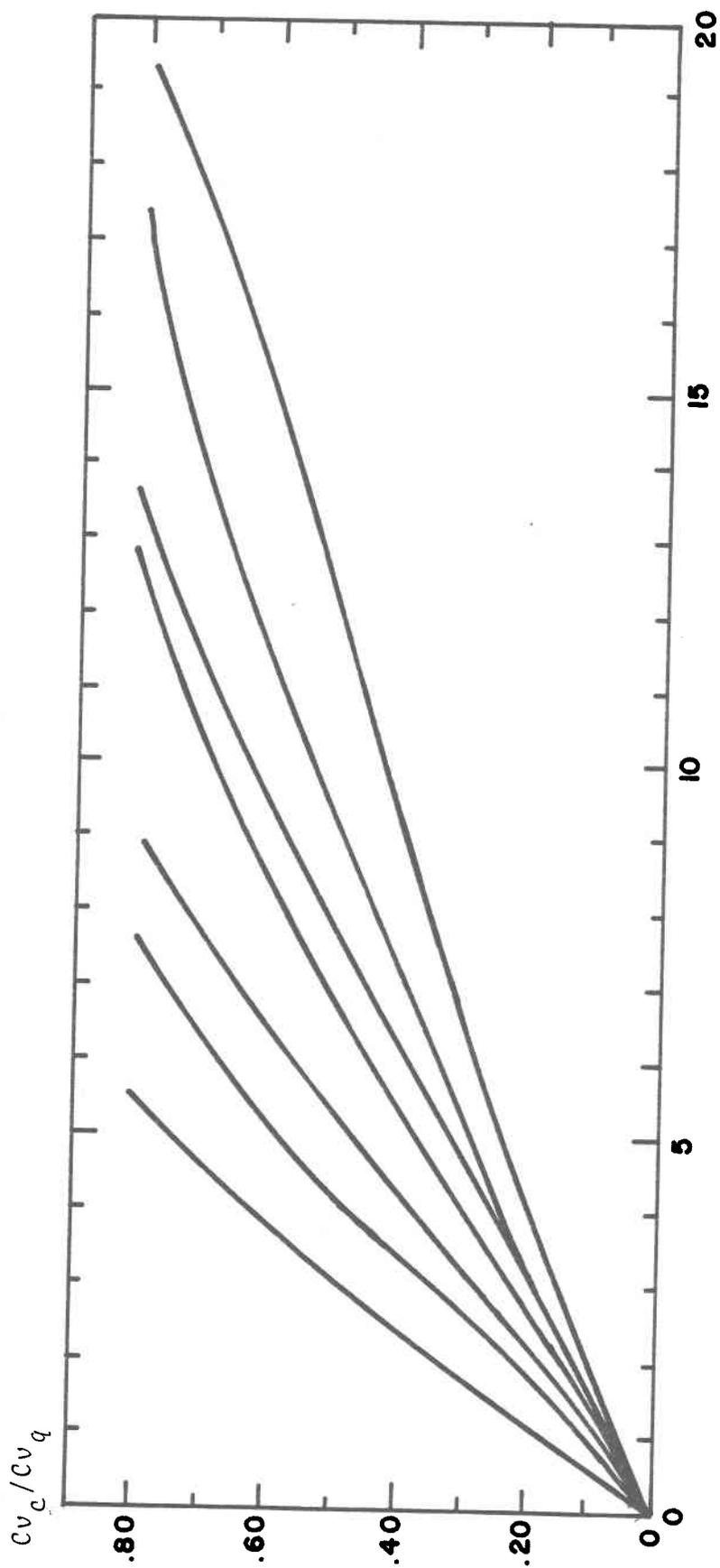
ERREUR RELATIVE EN POURCENTAGE

Figure 10 . Courbes lissées de la précision en fonction du rapport  $Cv_c / Cv_q$  pour les 7 pas de temps étudiés (cas 1, méthode 3).



ERREUR RELATIVE EN POURCENTAGE

Figure 11 .Courbes lissées de la précision en fonction du rapport  $Cv_c / Cv_q$  pour les 7 pas de temps étudiés (cas 2, méthode 3).



ERREUR RELATIVE EN POURCENTAGE

Figure 12 .Courbes lissées de la précision en fonction du rapport  $Cv_c / Cv_q$  pour les 7 pas de temps étudiés (cas 3, méthode 3).

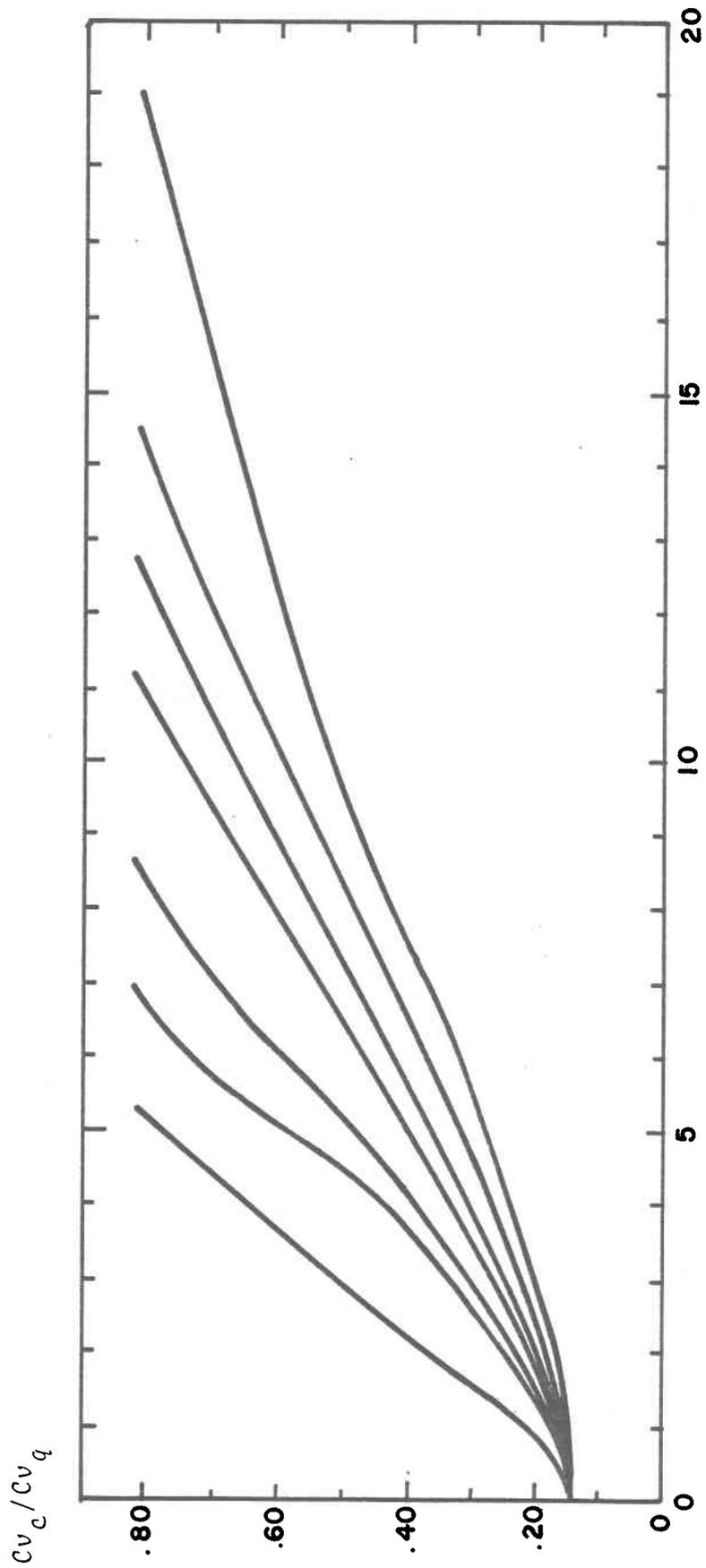
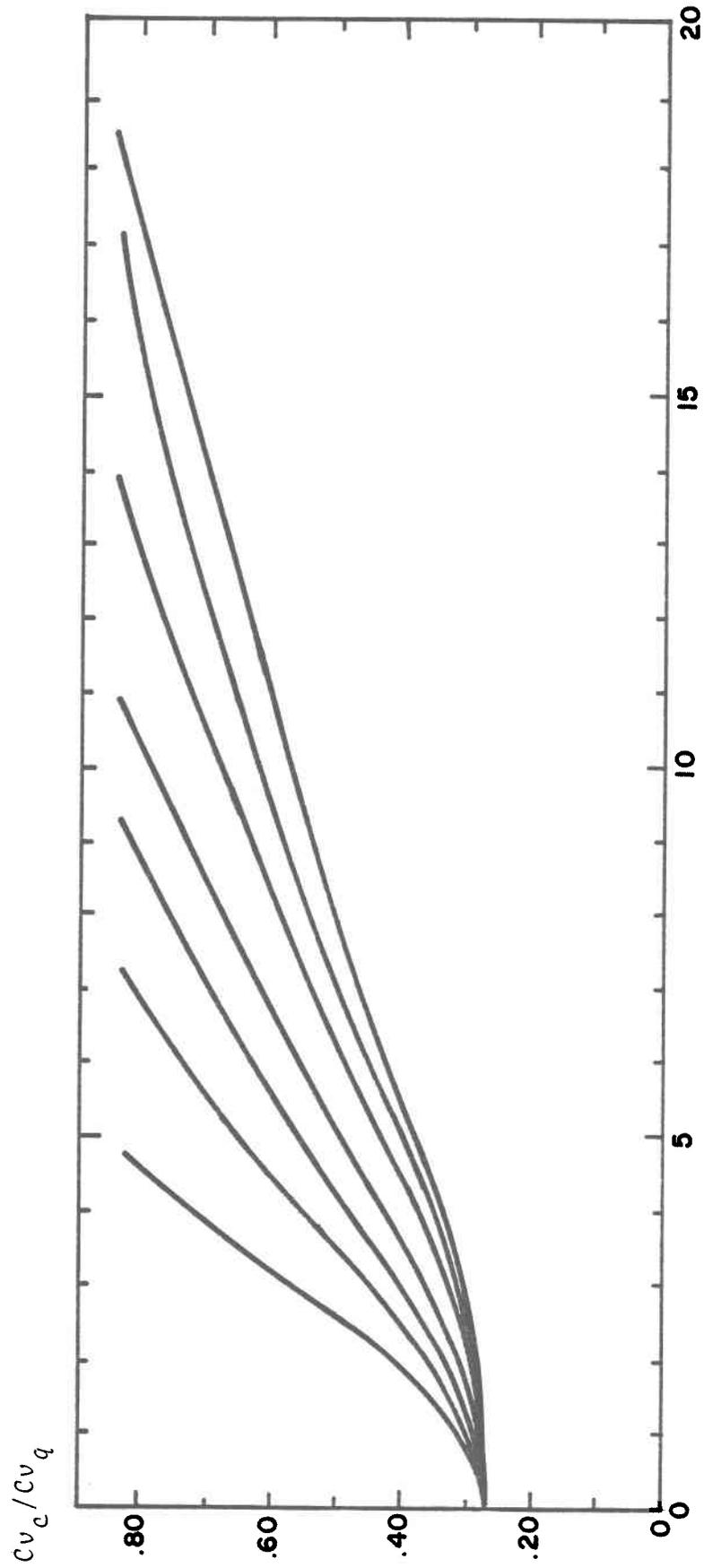


Figure 13 . Courbes lissées de la précision en fonction du rapport  $Cv_c / Cv_q$  pour les 7 pas de temps étudiés (cas 4, méthode 3).



ERREUR RELATIVE EN POURCENTAGE

Figure 14 . Courbes lissées de la précision en fonction du rapport  $Cv_c / Cv_q$  pour les 7 pas de temps étudiés (cas 5, méthode 3).

### 3.2.3 Application des courbes lissées au problème de l'échantillonnage

Les courbes lissées obtenues pour les cas types étudiés, bien qu'établies à partir d'une seule série de débits liquides peuvent, si elles sont utilisées dans des conditions similaires, aider à résoudre un aspect du problème de l'échantillonnage des données qualité et faciliter leur interprétation.

Le choix de la famille de courbes se fait à partir du comportement global du paramètre qui nous intéresse (par référence à la littérature ou transposition dans des régions semblables); son utilisation peut prendre deux formes.

Si une série de données historiques et une série de débits liquides sont disponibles, il est possible de caractériser le paramètre par le rapport des coefficients de variation des concentrations et des débits et de déterminer la fréquence d'échantillonnage optimale pour atteindre un objectif de précision donné compte tenu de la précision des débits liquides et de l'utilisation de la méthode 3 pour les calculs des débits massiques.

Inversement, si aucune donnée historique n'est disponible, le coefficient de variation des concentrations établi à la suite d'un pré-échantillonnage et le coefficient de variation des débits correspondants permettent d'estimer pour la fréquence utilisée, la précision des débits massiques liée à la méthode de calcul 3. A celle-ci s'ajoute la précision des

débits liquides.

Par exemple, dans le cas du fer, la tendance de base établie à partir des concentrations historiques à Lennoxville montre un minimum  $m$  de 0.01 mg/ℓ au jour 5.5 et un maximum  $M$  de 0.04 mg/ℓ au jour 210, une concentration moyenne  $\bar{X}$  de 0.03 mg/ℓ et un écart type de 0.1 mg/ℓ (tableau 2).

Les rapports  $m/\bar{X} = 0.33$  et  $M/\bar{X} = 1.33$  indiquent que la tendance de base du fer est similaire au cas 1 (tableau 3).

En utilisant le rapport des coefficients de variation des concentrations et des débits  $Cv_c/Cv_q$  de .39, on constate à la figure 10 que la précision des débits massiques liée uniquement à la méthode de calcul est environ 2, 2.8, 3.2, 4, 4.5, 6 et 8% pour des fréquences d'échantillonnage de 3, 5, 7, 11, 15 et 21 jours respectivement. En pratique, il faudrait de plus tenir compte des erreurs de mesure et d'analyse.

4.

#### CONCLUSION

Cette étude, malgré son cadre restreint, a donné lieu à des constatations intéressantes. Il faut retenir entre autres que :

la méthode 1 qui utilise les concentrations et les débits des jours d'échantillonnage seulement, est une mauvaise méthode d'évaluation des débits massiques;

la tendance de base d'un paramètre, quel qu'il soit, a beaucoup moins d'influence sur la précision du débit massique que les variations autour de celle-ci.

Ceci implique que pour évaluer la précision des débits massiques, il est plus important de caractériser un paramètre par le rapport des coefficients de variation des concentrations et des débits que tenter d'en établir la relation:  $\text{concentration} = f(Q)$ .

En général et particulièrement au Québec, le coefficient de variation des débits est beaucoup plus grand que celui des concentrations. Pour les paramètres dont les fluctuations autour d'une tendance sont faibles (certains des ions majeurs)

la fréquence d'échantillonnage aura une faible influence sur la précision du débit massique parce que l'incertitude liée à la méthode de calcul, pour des petits rapports  $Cv_c/Cv_q$  est minime par rapport à l'imprécision des débits liquides. Cependant, pour des paramètres telles les substances nutritives dont les fluctuations sont importantes, la précision des débits massiques sera très dépendante du choix de la fréquence d'échantillonnage parce que l'imprécision liée à la méthode augmente rapidement avec le pas de temps pour de grands rapports  $Cv_c/Cv_q$ .

Le facteur le plus important pour la détermination des débits massiques reste le débit liquide. Dans la présente étude, les débits ont été supposés connus sans erreur pour permettre de dégager l'influence des concentrations mais leur précision peut être faible et très variable suivant l'événement hydrologique. C'est pourquoi, les mesures simultanées des concentrations et des débits seraient préférables à la simulation par un modèle hydrologique.

De plus, une seule série de débits liquides ayant servi à évaluer la précision des débits massiques, les courbes lissées des erreurs relatives moyennes tracées pour la méthode 3 ne sont pas universelles; elles peuvent toutefois, être utilisées avec réserve pour plusieurs paramètres car le modèle de simulation choisi représente, de façon réaliste, les cas les plus fréquents.

Les résultats ainsi obtenus laissent entrevoir d'éventuelles études complémentaires telles que:

- . l'étude de l'universalité des courbes de précision des débits massiques par l'établissement de telles courbes pour plusieurs rivières d'une même région hydrologique;
  
- . le raffinement du modèle par la simulation saisonnière de concentrations qui tiennent compte des épisodes hydrologiques chacun ayant, comme Sherwani (1975) l'a suggéré, des fluctuations spécifiques;
  
- . le développement d'un nouveau modèle par la simulation des très fortes concentrations occasionnelles fréquemment exclues des séries historiques de concentrations. Souvent réelles et instantanées, ces fortes concentrations peuvent être reliées aux déversements accidentels de produits chimiques provenant de sources ponctuelles. Elles pourraient être simulées en introduisant dans la série de concentrations un terme stochastique positif suivant une fréquence et une distribution d'amplitudes spécifiques; la difficulté d'un tel modèle est de trouver, dans la série de données historiques, suffisamment d'information pour attribuer des valeurs réalistes de fréquence d'occurrence et d'amplitudes;

et tout autre développement permettant une meilleure définition de la précision des débits massiques.

Cette étude restreinte a cependant permis une mise au point pouvant avoir des répercussions au niveau de l'interprétation des débits massiques et de la rationalisation de l'acquisition de données de qualité de l'eau.

BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

- BENSON, M. A. (1965). Spurious Correlation in Hydraulics and Hydrology. Journal of the Hydraulics Division, ASCE 91 (HY 4): 35-42.
- BORMAN, F.H. et LIKENS, G.E. (1967). Nutrient cycling Science, 155: 424-429.
- CARBONNEL, J.P., MEYBECK, M. (1975). Quality variations of the Mekong river at Phnom Penh, Cambodia, and chemical transport in the Mekong bassin. J. Hydrol., 27: 249-265.
- CENTREAU (1974). Modèle de simulation du transport solide en suspension des rivières Châteauguay et Chaudière. Centreau, rapport scientifique CRE 74/05.
- DURUM, W.H. (1953). Relationship of the mineral constituents in solution to stream flow, Saline river near Russel, Kansas. Trans. Am. Geoph. Union, 34 (3): 435-442.
- FOREL, F.A. (1886). Le Lemane, monographie limnologique. Edition Rouge - Lausanne.

- HALL, F.R. (1970). Dissolved solids - discharge relationships. 1, Mixing Models. Water Resources Research 6 (3): 845-850.
- HALL, F.R. (1971). Dissolved solids - discharge relationships. 2, Applications to field data. Water Resources Research 7 (3): 591-601.
- HEMBREE, C.H. and RAINWATER, F.H. (1961). Chemical degradation on opposite flanks of the Wind River Range, Wyoming U.S. Geological Survey. Wat. Supply Paper 1535-E.
- HENDRICKSON, G.E., KRIEGER, R.A. (1964). Geochemistry of natural waters of the Blue Grass region, Kentucky, U.S. Geol. Survey Water Supply Paper 1700.
- HENSON, E.B. (1971). The calcium budget of Lake Champlain, U.S.A. and Canada. Verh. Internat. Verein, Limnol. 18.
- IAWORSKA, M. (1968). Recherches préliminaires sur la dépendance entre le débit et le contenu en principaux ions des eaux rivulaires. Ass. Int. Hydrol. Scient. Publ. 78: 24-27.
- INRS-eau (1976 a). Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières Saint-François et Yamaska. Volume I: secteur des métaux traces. INRS-eau, rapport scientifique no 51, 131 p., 103 T., 46 F., 9 annexes. (pour le Ministère des Richesses Naturelles, Québec).

INRS-eau (1976 b). Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières Saint-François et Yamaska. Volume 2: secteur des substances nutritives. INRS-eau, rapport scientifique no 52, 127 p., 108 T., 52 F., 8 annexes. (pour le Ministère des Richesses Naturelles, Québec).

INRS-eau (1976 c). Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières Saint-François et Yamaska. Volume 3: secteur du modèle d'apports. INRS-eau, rapport scientifique no 53, 105 p. (pour le Ministère des Richesses Naturelles, Québec).

INRS-eau (1976 d). Analyse des données qualité concernant les rives et les bilans de substances nutritives dans le fleuve Saint-Laurent. INRS-eau, rapport scientifique no 19, 117 p., 7 annexes. (pour les Services de Protection de l'Environnement du Québec).

INRS-eau (1976 e). Effets du décapage de la cuvette d'un réservoir sur la qualité de l'eau emmagasinée: élaboration d'une méthode d'étude et d'application au réservoir de Victoriaville (rivière Bulstrode, Québec). INRS-eau, rapport scientifique no 37, 304 p., 3 appendices. (pour le Ministère des Richesses Naturelles, Québec).

- INRS-eau (1978). Productivité biologique des eaux du lac Saint-Jean, rapport scientifique no 76. (pour les Services de Protection de l'Environnement).
- LEDBETTER, J.O., GLOYNA, E.F. (1964). Predictive techniques for water quality inorganics. Proc. Am. Soc. Civil Eng., J. Sanit. Eng. Div., 90 SAI: 127-151.
- MEYBECK, M. (1972). Qualité chimique naturelle de l'eau des rivières (ions majeurs) - revue de littérature. INRS-eau, rapport scientifique no 10, 40 p.
- MORIN, G., FORTIN, J.P. et CHARBONNEAU, R. (1975). Utilisation du modèle hydrophysiographique CEQUEAU pour l'exploitation des réservoirs artificiels. International symposium and workshops on the application of mathematical models in hydrology and water resources systems. IASH, Bratislava, 8-13 septembre, vol. 115: 176-184.
- PINDER, G.F., JONES, J.F. (1969). Determination of the ground water component of peakdischarge from the chemistry of total runoff. Water Resources Research, 5(2): 438-445.
- ST-MARTIN, H. (1967). Relations entre les facteurs d'ordre géologique et les caractéristiques de l'écoulement. Première partie: étude bibliographique. Ministère des Richesses Naturelles, rapport scientifique D.H.Q. - 3, 51 p.

- ST-MARTIN, H. (1970). Relations entre les facteurs d'ordre géologique et les caractéristiques de l'écoulement. Deuxième partie: étude du tarissement. Ministère des Richesses Naturelles, rapport scientifique D.H.Q.-7, 89 p.
- SHERWANI, J.K., MOREAU, D.H. (1975). Strategies of Water Quality Monitoring. U. North Carolina, Water Resources Research Institute, scientific report no 107, 137 p.
- TAYLOR, A.W., EDWARDS, W.M. et SIMPSON, E.C. (1971). Nutrients in stream draining woodland and farmland near Coskocton, Ohio. Wat. Res. Res., 7 (1): 81-83.

REFERENCES ADDITIONNELLES

- EDWARDS, A.M.C. (1973). The variation of dissolved constituents with discharge of some Norfolk rivers. J. Hydrology, 18: 219-282.
- EDWARDS, A.M.C. (1974). Silicon detection in some Norfolk rivers. Freshwater Biol., 4: 267-274.
- MONTGOMERY, H.A.C., HART, I.C. (1973). The desing of sampling programmes for rivers and effluents. Water Pollution Control 1973, part 5.
- O'CONNOR, D.J. (1976). The concentration of dissolved solids and river flow. Water Resources Research, 12 (2): 279-294.
- OGUN, E., ERLEBACK, W.E. (1976). Limitations of single water samples in representing mean water quality. Environment Canada Technical Bulletin 95.

ANNEXE 1

CONCENTRATIONS DES PARAMETRES ETUDIES A LENNOXVILLE

ECHANTILLONS NATURELS

## Concentrations en mg/l des paramètres mesurés à Lennoxville

Date	N tot	NO3	Ca	Fe	Mg	Cl	SiO2	SO4
09/01/74	-	0.32	9.8	-	3.7	3.4	5.7	9.0
15/01/74	-	0.23	9.5	-	3.7	3.0	5.8	10.0
06/02/74	-	-	11.5	0.19	3.6	-	5.5	-
12/02/74	-	-	11.2	0.17	3.7	-	5.6	-
06/03/74	0.68	0.47	9.7	0.28	2.2	3.8	3.7	5.0
12/03/74	0.57	0.36	9.0	0.12	2.6	2.4	6.3	7.0
03/04/74	0.49	0.26	10.2	0.14	3.2	4.5	5.2	6.5
09/04/74	0.63	0.36	8.6	0.14	1.7	2.4	4.1	4.5
08/05/74	0.53	0.23	7.1	0.24	2.7	2.2	4.1	3.0
14/05/74	0.68	0.27	7.6	0.24	2.2	2.2	3.6	4.0
05/06/74	0.25	0.11	9.6	0.14	2.4	2.3	3.5	5.0
11/06/74	0.33	0.14	10.6	0.48	2.7	2.9	3.5	5.0
04/07/74	0.14	0.02	11.8	0.23	2.7	2.4	3.0	5.0
09/07/74	0.25	0.07	9.5	0.33	2.5	2.3	3.7	6.0
31/07/74	0.47	0.14	10.2	0.32	2.2	2.1	4.6	4.0
06/08/74	0.54	0.09	11.0	0.56	2.3	2.0	3.5	6.0
28/08/74	0.32	0.07	11.3	0.29	3.7	2.7	3.1	8.5
04/09/74	0.36	0.16	12.5	0.30	2.3	2.9	3.5	7.5
25/09/74	0.43	0.09	13.0	0.24	2.4	1.9	4.2	8.0
01/10/74	0.31	0.07	12.8	0.23	3.0	2.9	3.7	6.1
23/10/74	0.34	0.14	11.0	0.24	3.0	2.0	4.3	8.0
29/10/74	0.31	0.14	11.0	0.21	2.8	2.9	4.1	8.2
20/11/74	0.47	0.18	11.0	0.19	2.6	2.7	4.7	7.4
26/11/74	0.61	0.47	10.5	0.20	2.1	2.5	4.5	8.0
15/01/75	0.61	0.41	11.8	0.17	2.9	3.8	5.0	8.5
21/01/75	0.60	0.38	14.0	0.20	3.8	2.7	5.3	7.2
12/02/75	0.49	0.29	10.5	0.09	3.4	2.6	4.9	6.6
18/02/75	0.43	0.29	10.5	0.10	3.4	2.7	4.8	7.0
12/03/75	0.66	0.36	12.0	0.12	2.9	3.1	4.8	8.1
18/03/75	0.61	0.38	12.5	0.12	4.7	4.2	4.8	7.4
16/04/75	0.66	0.36	11.0	0.27	2.9	3.9	4.8	6.5
22/04/75	0.53	0.38	7.5	0.24	1.8	2.5	4.0	6.0

Concentrations en mg/l des paramètres mesurés à Lennoxville  
(suite)

Date	N tot	NO3	Ca	Fe	Mg	Cl	SiO2	SO4
14/05/75	0.51	0.27	8.9	0.10	1.6	1.9	3.3	6.8
21/05/75	0.41	0.14	9.9	0.16	2.2	2.5	2.8	7.9
11/06/75	0.39	0.09	10.5	0.24	2.3	1.9	4.5	4.9
17/06/75	0.36	0.07	9.8	0.21	3.0	2.4	3.7	7.7
30/73/75	0.41	0.11	12.2	0.27	2.9	3.0	3.5	8.9
29/07/75	0.28	0.07	28.0	0.61	4.4	3.6	2.8	10.0
20/08/75	-	0.00	10.8	0.25	4.2	3.5	3.0	10.1
17/09/75	-	0.00	11.0	0.19	2.3	2.9	4.2	11.7
24/09/75	-	0.00	12.0	0.28	2.7	2.7	3.6	11.9
15/10/75	0.35	0.07	12.0	0.20	2.4	2.6	4.2	8.6
22/10/75	0.43	0.14	9.0	0.39	1.9	2.9	4.3	11.2
19/11/75	0.35	0.20	9.8	0.25	2.9	2.8	4.0	10.0
26/11/75	0.37	0.25	9.0	0.18	2.8	2.9	4.6	10.3

ANNEXE 2

DEBITS LIQUIDES A LENNOXVILLE 1974

NDIC= 1	4811.0	4401.9	4145.3	2861.0	1991.7	1837.7	1803.9	1809.8	1791.4	1814.9	1813.8	1778.4	1742.0	1819.8
C	5438.0	1889.8	1872.1	1855.2	1871.0	1894.9	1920.7	2070.3	2307.6	3115.9	5407.5	7514.1	6968.8	6302.6
NDIC= 2	6008.9	5213.7	4088.1	3712.9	3051.4	2301.5	2243.0	2159.2	2106.3	2069.9	2044.0	2022.7	1999.5	1976.9
C	1957.8	1940.8	1925.8	1909.1	1960.9	1977.9	1931.1	1900.1	2098.6	2243.0	2294.2	2555.9		
NDIC= 3	3220.6	3754.6	3642.3	6597.2	11007.2	10392.9	11704.1	12998.8	9840.1	7813.7	4354.2	3542.5	3400.5	3410.1
C	3826.8	4618.9	4369.1	3800.7	3073.7	2624.0	2445.6	2445.5	2770.6	2617.7	2085.3	1927.7	1829.9	1761.9
NDIC= 4	2812.3	3336.2	6226.3	13037.1	18097.7	17155.0	12301.8	9217.0	7006.1	5192.8	4022.6	3788.5	5189.5	10421.6
C	14336.7	13698.0	12967.3	11537.4	9608.3	9662.3	13451.3	19748.7	26608.7	16937.3	11304.2	10393.9	12947.6	16924.5
NDIC= 5	11501.5	15533.9	18025.6	16663.6	13254.2	11269.0	10914.0	10851.6	10095.8	10445.6	11118.4	11687.6	10445.9	9511.2
C	7201.5	5596.1	4769.3	4141.8	3882.1	3079.2	3175.6	6070.3	8995.9	11626.2	11502.6	9818.0	8107.6	6804.2
NDIC= 6	4099.3	4224.3	3891.3	4174.3	4233.1	4026.5	3708.5	3487.1	3315.3	3794.4	4328.6	3406.9	2961.8	2611.7
C	2343.4	3087.5	3479.3	2150.6	2102.8	2282.5	2580.6	2225.9	2086.9	2001.3	2046.8	1991.0	2375.8	3094.2
NDIC= 7	2963.4	2396.2	2127.8	2334.3	3182.6	4392.6	4109.6	4002.9	7365.2	6361.6	5140.8	3980.0	3124.6	2715.7
C	2526.1	2407.2	3394.6	6383.4	6346.9	4695.7	3794.0	3164.3	2674.1	2359.7	2281.6	2714.6	3029.0	3356.2
NDIC= 8	3628.8	3237.3	3475.6	4325.6	8507.7	5733.0	4433.5	3686.0	3009.0	2733.0	2538.6	2460.5	2390.9	2334.4
C	2009.3	2723.7	3452.1	3579.2	3448.2	2829.8	2435.6	2012.7	1747.1	1615.8	1469.9	1425.9	1414.0	1412.8
NDIC= 9	1352.9	1325.6	1313.9	1321.5	1334.6	1359.6	1334.6	1309.6	1352.3	1500.2	1555.7	1806.4	1745.6	1784.4
C	1765.1	1894.1	2068.1	1938.7	2355.3	3359.1	4175.6	4016.2	3813.5	3533.1	3098.6	2389.3	2101.4	2093.9
NDIC= 10	1967.3	2335.4	2818.4	2549.0	2357.9	2219.4	2055.8	1819.3	1615.1	1464.8	1326.5	2627.9	3210.4	4964.3
C	5332.7	4833.5	4495.1	3604.7	2823.5	2316.4	1990.5	1786.3	1671.9	1687.7	2610.3	2656.0	2377.1	2326.6
NDIC= 11	6677.9	6620.3	5807.7	4976.9	4114.2	3577.0	2986.0	2518.7	2092.8	1761.1	1387.8	1550.2	3062.3	5127.0
C	4335.5	4090.6	3943.4	3578.4	4455.2	7566.6	6843.1	6791.7	5092.7	6393.7	4814.0	3865.2	2999.1	2402.0
NDIC= 12	2016.1	1758.4	1570.8	1425.6	1324.4	1305.1	1614.3	3496.1	5388.2	4513.8	3360.0	3188.1	2786.4	2301.9
C	1961.0	1734.2	1577.9	1469.7	1411.1	1378.0	1352.7	1370.9	1416.0	1390.0	1320.2	1316.5	1312.9	1296.8
C														1307.9

ANNEXE 3

PROGRAMME SIMUL

```

PROGRAM SIMUL(INPUT,OUTPUT,DATA,TAPE1=DATA)
REAL CSS(21)
REAL CS(21)
REAL MC(101),SC(101),CVC(101)
REAL MOY(21),SIG(21)
REAL Q1(396)
REAL Q(365),CONC(396),YFL(365) ,CON(365)
REAL TABLO(101,21)
INTEGER PT(7)
DATA PT/3,5,7,11,15,21,31/
READ(1,1) Q1
DO 300 IC=1,5
CALL GENER(CON,IC)
YMC=SMC=0
DO 90 I=1,365
SMC=SMC+CON(I)*CON(I)
90 YMC=YMC+CON(I)
YMC=YMC/365
SMC=SMC-365*YMC*YMC
SMC=(SMC/364)**0,5
CSMC=SMC/YMC
DO 130 ID=2,2
XMQ=SQ=0
IF(ID,EQ,1) IN=0
IF(ID,EQ,2) IN=5
IF(ID,EQ,3) IN=360
DO 50 I=1,396
IF(Q1(I),LT,0) GO TO 50
IN=IN+1
IF(IN,GT,365) IN=IN-365
Q(IN)=Q1(I)
XMQ=XMQ+Q1(I)
SQ=SQ+Q1(I)*Q1(I)
50 CONTINUE
XMQ=XMQ/365
SQ=SQ-365*XMQ*XMQ
SQ=(SQ/364)**0,5
CVQ=SQ/XMQ
DO 110 ISIGMA=1,8
SIGMA=YMC/10,*ISIGMA
DO 140 I=1,365
140 YFL(I)=0
NBSR=0
DO 10 IS=1,101
XLO=0
IF(IS,EQ,1) GO TO 40
CALL NORMAL(SIGMA,0,YFL)
40 MC(IS)=SC(IS)=0
DO 20 I=1,365
CONC(I)=CON(I)+YFL(I)
IF(CONC(I),GT,0) GO TO 100
CONC(I)=0
NBSR=NBSR+1
100 MC(IS)=MC(IS)+CONC(I)
SC(IS)=SC(IS)+CONC(I)*CONC(I)
20 XLO=XLO+CONC(I)*Q(I)
MC(IS)=MC(IS)/365

```

```

SC(IS)=SC(IS)-365*MC(IS)*MC(IS)
SC(IS)=(SC(IS)/364)**0.5
CVC(IS)=SC(IS)/MC(IS)
DO 70 I=366,396
J=I-365
CONC(I)=CONC(J)
70 CONTINUE
DO 30 IT=1,7
KT=PT(IT)
CALL L1(Q,CONC,XL1,KT)
X      =(XL1-XL0)/XL0*100.0
TABLO(IS,IT)=X
CALL L2(Q,CONC,XL2,KT)
X      =(XL2-XL0)/XL0*100.0
TABLO(IS,IT+7)=X
CALL L3(Q,CONC,XL3,KT)
X      =(XL3-XL0)/XL0*100.0
TABLO(IS,IT+14)=X
30 CONTINUE
10 CONTINUE
IY=101
DO 120 I=2,IY
XMC=MC(I)+XMC
XSC=XSC+SC(I)
120 XCVC=XCVC+CVC(I)
XMC=XMC/IY
XSC=XSC/IY
XCVC=XCVC/IY
PRINT 4,NOM,SIGMA,NBSR
GO TO (150,160,170),ID
150 PRINT 12
GO TO 180
160 PRINT 13
GO TO 180
170 PRINT 14
180 PRINT 15,XMQ,SG,CVQ
DO 60 I=1,21
XM=0
DO 80 J=2,IY
X=TABLO(J,I)
XM=XM+X
SIG(I)=SIG(I)+X*X
IF(X.LT.0) X=-X
80 MOY(I)=MOY(I)+X
XM=XM/IY
XM2=XM3=0
DO 210 J=2,101
XM3=XM3+(TABLO(J,I)=XM)**3
210 XM2=XM2+(TABLO(J,I)=XM)**2
XM2=XM2/100
XM3=XM3/100
CS(I)=XM3/(XM2**1.5)
MOY(I)=MOY(I)/IY
SIG(I)=SIG(I)-IY      *XM*XM
IF(SIG(I).LT.0) SIG(I)=-SIG(I)
60 SIG(I)=(SIG(I)/(IY-1))**0.5
PRINT 7,XMC,XSC,XCVC
PRINT 9,PT,PT,PT

```

```

PRINT 8,(TABLO(1,I),I=1,21)
PRINT 11,MOY,SIG
PRINT 16,CS
DO 61 I=1,21
IF(CS(I).LT,0) CS(I)=-CS(I)
IF(CS(I).GT,0,62) CSS(I)=3
IF(CS(I).LE,0,62) CSS(I)=2
IF(CS(I).LE,0,45) CSS(I)=1
61 CONTINUE
PRINT 16,CSS
110 CONTINUE
130 CONTINUE
300 CONTINUE
1 FORMAT(10X,11E5)
2 FORMAT(4X,A2,4X,11F5,2,/,33(10X,11F5,2,/))
3 FORMAT(F5,1)
4 FORMAT(1H1,/,5X,*SIMULATIONS DE FLUCTUATIONS*,/,5X,
1 *ELEMENT*,1H*,A2,1H*,/,5X,*VALEUR DE SIGMA*,F10,2,/,
25X,*NOMBRE DE VALEURS REJETEES*,I7)
5 FORMAT(1X,11F8,2)
6 FORMAT(1X,F15,1)
7 FORMAT(5X,*CARACTERISTIQUES DES CONCENTRATIONS*,9X,*MOYENNE SIGMA
5GMA S/M*,/,45X,3F10,2,/)
8 FORMAT(* S=0*,21F6,2)
9 FORMAT(18X,*METHODE 1*,35X,*METHODE 2*,35X,*METHODE 3*,/,3X,21I6,
1/)
11 FORMAT(* MOY*,21F6,2,/,* SIG*,21F6,2)
12 FORMAT(5X,*DEBITS NORMAUX*)
13 FORMAT(5X,*DEBITS DECALES DE +5 JOURS*)
14 FORMAT(5X,*DEBITS DECALES DE -5 JOURS*)
15 FORMAT(5X,*CARACTERISTIQUES DES DEBITS*
3,9X,*MOYENNE SIGMA S/M*,/,37X,3F10,2,/)
16 FORMAT(* CS*,21F6,2)
END

```

```
SUBROUTINE GENER(CON,IC)
REAL CON(365)
CON(114)=4+2*IC
CON(297)=16-2*IC
XINT=(CON(297)-CON(114))/183
DO 10 I=115,296
  J=I-114
10 CON(I)=CON(114)+XINT*J
  XINT=(CON(114)-CON(297))/182
  DO 20 I=298,478
    K=I
    IF(K.GT.365) K=K-365
    J=I-297
20 CON(K)=CON(297)+XINT*J
  RETURN
END
```

```
SUBROUTINE NORMAL(S,AM,V)
REAL V(365)
DO 10 I=1,365
  A=0.0
  DO 20 K=1,12
    YFL=RANF(N)
20 A=A+YFL
  V(I)=(A-6.0)*S+AM
10 CONTINUE
  RETURN
END
```

```
SUBROUTINE L3(Q,C,XL3,KT)
REAL C(365),Q(365)
XL3=0
KP=365/KT
IRP=365-KP*KT
J1=(KT+1)/2
DO 10 I=1,KP
J=J1+KT*(I-1)
XL3=XL3+C(J)*Q(J)
JKT=J+KT
IF(JKT.GT.365) JKT=JKT-365
XINT=(C(JKT)-C(J))/KT
IF(I.EQ.KP1) XINT=(C(JKT)-C(J))/IRP
KT1=KT-1
DO 20 K=1,KT1
JK=J+K
IF(JK.GT.365) JK=JK-365
IF(JK.EQ.J1) GO TO 10
XL3=XL3+(C(J)+XINT*K)*Q(JK)
20 CONTINUE
10 CONTINUE
IF(IRP.EQ.0) RETURN
J=J1+KT*KP
IF(J.GT.365) J=J-365
XL3=XL3+C(J)*Q(J)
XINT=(C(J1)-C(J))/IRP
KT1=KT-1
DO 30 K=1,KT1
JK=J+K
IF(JK.GT.365) JK=JK-365
IF(JK.EQ.J1) RETURN
30 XL3=XL3+(C(J)+XINT*K)*Q(JK)
RETURN
END
```

ANNEXE 4

PRECISION DES DEBITS MASSIQUES

RESULTATS DES CALCULS, METHODE 3

pas de temps $Cv_c/Cv_q$	3		5		7		11		15		21		31	
	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$
.27	0		0		0		0		0		0		.5	
.29	.7	.1	1.2	.2	1.5	.2	1.9	.2	2.2	.3	2.2	.3	2.8	.4
.35	1.8	.2	2.5	.3	3.2	.4	3.3	.4	4.0	.5	5.5	.7	5.6	.7
.45	2.3	.3	3.5	.4	3.9	.5	4.8	.6	6.0	.7	6.8	.9	9.2	1.2
.53	3.1	.4	5.4	.6	5.5	.7	6.7	.8	9.3	1.1	10.5	1.3	11.4	1.5
.62	3.4	.4	5.9	.7	7.2	.9	9.6	1.2	8.9	1.1	12.4	1.5	14.4	1.7
.70	3.8	.5	5.8	.7	6.7	.8	9.7	1.2	11.8	1.5	15.2	1.9	15.8	2.0
.78	4.7	.6	6.1	.7	8.5	1.0	10.4	1.3	13.6	1.6	16.0	1.9	17.5	2.1
.85	6.3	.7	7.3	1.0	8.7	1.0	12.1	1.5	12.4	1.6	15.0	2.0	20.3	2.5

- . pas de temps en jours
- . E: erreur relative moyenne en %
- . précision de E  $\pm \sigma/\sqrt{N}$

Tableau A.4.1 cas 1, minimum en crue

pas de temps $cv_c/cv_q$	3		5		7		11		15		21		31	
	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$
.14	0		0		0		0		0		0		.2	
.19	.8	.1	1.0	.1	1.5	.2	1.8	.2	2.1	.3	2.3	.3	2.9	.3
.27	1.7	.2	2.1	.3	2.9	.4	3.6	.4	4.0	.5	4.6	.6	5.3	.7
.38	2.8	.3	3.2	.4	4.2	.5	4.9	.6	6.3	.8	7.7	.9	8.4	1.1
.48	3.2	.4	4.9	.6	4.3	.5	6.4	.8	8.1	1.0	9.8	1.2	10.3	1.3
.59	3.9	.5	5.1	.6	6.7	.8	8.9	1.1	7.5	1.0	11.6	1.4	13.6	1.7
.68	4.5	.5	5.9	.7	6.7	.8	8.7	1.1	10.3	1.3	11.8	1.5	16.9	2.1
.76	5.5	.6	7.1	.9	8.2	1.0	11.2	1.4	14.2	1.7	15.2	1.9	16.6	2.0
.84	5.2	.6	7.6	.9	10.5	1.3	13.7	1.7	14.0	1.8	16.9	2.0	18.4	2.4

Tableau A.4.2, cas 2, minimum en crue.

pas de temps $Cv_c/Cv_q$	3		5		7		11		15		21		31	
	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$
0	0		0		0		0		0		0		0	
.13	.7	.1	1.0	.1	1.2	.2	1.8	.2	2.0	.2	2.3	.3	2.7	.3
.25	1.6	.2	2.2	.3	2.3	.3	3.3	.4	3.9	.5	3.8	.5	4.7	.6
.35	2.3	.3	3.2	.4	4.1	.5	4.4	.6	5.3	.7	6.7	.9	8.3	1.0
.47	3.1	.4	4.1	.5	4.9	.6	6.2	.8	6.9	.8	7.9	1.0	11.5	1.5
.58	3.9	.5	4.5	.6	5.7	.7	7.6	1.0	9.0	1.1	11.0	1.4	13.0	1.6
.67	4.3	.5	5.9	.7	8.0	1.0	9.7	1.2	11.0	1.4	12.6	1.5	15.1	1.8
.75	4.8	.6	6.7	.8	7.3	.9	9.9	1.3	11.8	1.5	15.4	1.9	18.2	2.2
.82	5.6	.7	7.8	1.0	9.1	1.2	13.2	1.7	13.1	1.6	17.4	2.1	18.4	2.3

Tableau A.4.3, cas 3, une droite horizontale.

pas de temps $c_{v_c}/c_{v_q}$	3		5		7		11		15		21		31	
	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$
.14	0		0		0		0		0		0		.2	
.19	.8	.1	1.1	.1	1.3	.2	1.6	.2	2.1	.2	2.3	.3	2.4	.3
.27	1.3	.2	2.3	.3	2.5	.3	3.1	.4	3.6	.5	4.8	.6	5.2	.6
.38	2.1	.3	3.3	.4	4.0	.5	4.8	.6	5.6	.7	6.2	.8	7.1	.9
.48	2.7	.3	4.8	.6	4.7	.6	6.7	.8	6.2	.8	7.7	1.0	9.1	1.1
.59	3.6	.4	5.1	.6	6.1	.7	7.3	.9	8.6	1.1	9.7	1.2	11.3	1.4
.67	4.0	.5	5.0	.6	6.5	.8	9.2	1.2	10.9	1.3	12.0	1.4	15.6	2.0
.76	5.1	.6	5.9	.8	7.7	1.0	9.8	1.2	10.4	1.3	13.8	1.8	15.4	2.0
.84	5.2	.6	7.5	.9	8.8	1.1	12.1	1.5	13.5	1.6	14.7	1.7	18.9	2.2

Tableau A.4.4, cas 4, maximum en crue.

pas de temps $c_{v_c}/c_{v_q}$	3		5		7		11		15		21		31	
	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$	E	$\sigma/\sqrt{N}$
.27	0		0		0		0		0		0		.4	
.30	.8	.1	1.0	.1	1.2	.1	1.7	.2	2.0	.2	1.9	.2	2.7	.3
.35	1.4	.2	1.9	.2	2.3	.3	2.9	.4	3.8	.4	4.0	.5	4.3	.5
.45	2.0	.2	2.8	.3	3.3	.4	4.2	.5	4.9	.6	5.6	.7	6.5	.8
.54	3.0	.4	3.7	.5	4.3	.5	5.0	.6	6.8	.8	7.3	.9	9.5	1.2
.62	3.1	.4	4.3	.5	5.7	.7	7.7	1.0	9.0	1.1	9.5	1.2	13.0	1.6
.70	4.0	.5	5.3	.7	7.3	.9	7.7	1.0	9.8	1.2	11.4	1.4	13.6	1.8
.79	3.9	.5	6.3	.8	8.9	1.1	8.9	1.1	11.5	1.5	14.1	1.7	17.3	2.1
.86	5.2	.6	7.2	.9	8.6	1.1	10.9	1.4	14.0	1.7	17.1	2.1	17.0	2.1

Tableau A.4.5, cas 5, maximum en crue.