

MODÉLISATION DE L'AZOTE TOTAL
EN RIVIÈRE À L'AIDE DU MODÈLE
QUANTITÉ-QUALITÉ CEQUEAU

par

Morin, Guy

Cluis, Daniel

Couillard, Denis

Jones, H. Gérald

Gauthier, Jean-Maurice

Soumis pour publication dans
Journal Canadien de Génie Civil

Janvier 1987

INRS-Eau

Université du Québec

2700, rue Einstein - C.P. 7500

Sainte-Foy (Québec), Canada

G1V 4C7

RÉSUMÉ

Le modèle d'azote présenté permet d'estimer la concentration d'azote total à n'importe quel point d'un bassin versant en utilisant les composantes hydrologiques calculées par le modèle CEQUEAU. À cette fin, le bassin versant est divisé en carreaux de même dimension sur lesquels une fonction de production quantifie les différentes sources d'azote pour estimer la charge totale qui s'accumule à la surface du sol ou sur le couvert de neige. La charge d'azote totale subit une dégradation en fonction de la température de l'air et n'est entraînée en rivière que s'il y a du ruissellement superficiel causé par les précipitations liquides ou par la fonte de neige. Les charges produites au niveau du sol s'ajoutent aux charges inhérentes aux trois formes d'écoulement (ruissellement, écoulement hypodermique, écoulement de base). Une fonction de transport effectue le bilan des charges en rivière, transitées de l'amont vers l'aval d'une manière similaire aux débits et tient compte, s'il y a lieu, des charges ponctuelles arrivant directement en rivière. Les charges en rivière subissent une dégradation qui est fonction de la température de l'eau. Les sources d'azote considérées sont les précipitations, les dépôts atmosphériques secs, les rejets municipaux et industriels, les fumiers d'animaux et les engrais chimiques. Le modèle a été appliqué au bassin versant de la rivière Sainte-Anne, Québec (superficie du bassin: 2 700 km²) et permet de reproduire l'allure générale des concentrations mesurées à La Pérade pour les années 1978, 1979 et 1980.

MOTS CLÉS: Modélisation, rivière, azote, apport, ruissellement, hypodermique, écoulement de base.

ABSTRACT

A model for nitrogen concentrations in running waters has been developed and associated with the hydrological model CEQUEAU. The model allows the simulation of total nitrogen concentrations at any point in a watershed during various hydrological event. The catchment area is first subdivided into discrete elements; each element is associated with a production function which quantifies the accumulation of nitrogen at the soil-atmosphere interface. Supplementary functions describe the transformations of nitrogen species in the soil and the transfer of the nitrogen load, towards the hydrographic system by runoff caused by rain and/or snowmelt and the transport of the different nitrogen compounds downstream. Another function is used to represent the in-stream transformation. Nitrogen data inputs to be modeled are those from precipitation dry deposition, diffuse sources due to agricultural practices and industrial point sources. The model was applied to the Ste-Anne River, Québec (catchment area, 2 700 km²) in order to reproduce the observed Nitrogen concentrations of 1978, 1979 and 1980. Model performance was judged to be promising and it is proposed to validate the model by the simulation of nitrogen concentration on other rivers for which land use and industrial activity are well documented.

INTRODUCTION

L'azote en milieu aquatique provient de plusieurs sources: des précipitations sèches sous formes d'aérosols et de poussière, de la pluie, de la neige, de l'altération et la décomposition des sols, des débris organiques d'origines végétale et animale, des excréctions animales et humaines, des rejets municipaux et industriels, des apports reliés à l'agriculture comme le lessivage des engrais, etc (Cluis et al., 1979).

L'azote est impliquée dans une multitude de réactions chimiques ou biologiques et ne peut être considéré comme stable et conservatif (National Academy of Sciences 1978; Sain et al., 1977; Van Kessel 1977). Selon le degré de raffinement recherché dans la définition du cycle de l'azote et en fonction des données disponibles, la modélisation de l'azote en milieu aquatique sera plus ou moins complexe. Dans la plupart des modèles, les réactions de transformation de l'azote sont représentées par des équations différentielles de premier ordre dont les coefficients sont variables en fonction de la température (Zison et al., 1978).

Outre les modèles relatifs au cycle de l'azote en milieu aquatique (Stewart et al., 1982), il existe toute une série de modèles d'apports développés dans le cadre d'études sur les sources diffuses de polluants dans les bassins agricoles (Johnson et Straub, 1971; McElroy et al., 1975; Constable 1975; Cluis et Durocher, 1976; Couillard et Cluis, 1980). Ces modèles d'apports sont habituellement définis à l'échelle d'un bassin versant, ils sont largement empiriques, compte tenu de la complexité des processus modélisés, de l'imprécision et du manque de données et d'une connaissance

insuffisante des phénomènes physiques chimiques et biologiques impliqués. Ils ne peuvent être extrapolés qu'avec prudence.

Le modèle d'azote total proposé fait partie d'un ensemble de modèles de qualité de l'eau (Morin et al., 1983a; 1983b; 1984a; 1984b, 1985; 1986a; 1986b) couplés au modèle hydrologique CEQUEAU (Girard et al., 1972; Morin et al., 1975; 1981). Le modèle d'azote comporte une fonction de production (Couillard et Cluis, 1980) au niveau du bassin versant et une fonction de transport en rivière. La fonction de production quantifie les différentes sources d'azote au niveau du sol et évalue, en utilisant les composantes hydrologiques de l'écoulement fournies par le modèle CEQUEAU, la charge entraînée en rivière. La fonction de transport utilise les volumes d'eau écoulés en rivière, calculés par le modèle hydrologique, pour estimer les charges d'azote transitées de l'amont vers l'aval et tenir compte, s'il y a lieu, des charges ponctuelles arrivant directement en rivière. Le découpage du bassin versant en carreaux dont la dimension dépend de sa superficie et l'unité territoriale de base des données d'apports permettent l'estimation des concentrations d'azote total en n'importe quel point d'un bassin versant.

INTÉGRATION AU MODÈLE HYDROLOGIQUE CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU développé à l'INRS-Eau (Girard et al. 1972; Morin et al. 1981) est un modèle conceptuel qui prend en compte les caractéristiques physiographiques du bassin versant. Il est découpé en éléments appelés carreaux entiers sur lesquels la production hydrologique est calculée. Un deuxième découpage, en fonction de la ligne de partage des

eaux, donnant des éléments appelés carreaux partiels est requis pour reproduire le cheminement de l'eau en rivière. Le modèle permet d'estimer les composantes du cycle hydrologique, précipitations liquides et solides, évaporation, infiltration, écoulement superficiel, hypodermique et de base ainsi que le volume d'eau transitant en rivière à chaque pas de temps et sur chaque élément du bassin versant.

Pour estimer les concentrations à n'importe quel point du bassin versant et ainsi pouvoir simuler l'effet des changements d'utilisation du territoire, les sous-modèles de qualité de l'eau couplés au modèle hydrologique CEQUEAU utilisent dans plusieurs équations les composantes du cycle hydrologique calculés par le modèle CEQUEAU (Morin et al., 1986a; 1986b).

LE MODÈLE D'AZOTE TOTAL

Le modèle proposé considère l'azote total en rivière, à savoir l'azote sous forme de nitrites, de nitrates, d'azote ammoniacal ou d'azote organique. Ce modèle comporte un sous-modèle de production dans lequel les charges provenant des différentes sources sont estimées et un sous-modèle de transport en rivière.

Production

Par production, on entend l'estimation des charges provenant des sources d'azote sur le bassin versant. Il importe de distinguer les charges diffuses et les charges ponctuelles. Les charges diffuses sont liées à l'utilisation du territoire et sont réparties spatialement. Elle peuvent

cheminer un certain temps sur et dans le sol avant d'arriver au cours d'eau, comme par exemple l'azote provenant des engrais chimiques épandus sur le sol. Les charges ponctuelles sont celles qui arrivent directement à la rivière, comme par exemple celles associées à l'exutoire d'un réseau d'égouts ou à l'effluent d'une industrie (Couillard et Cluis, 1980; 1980a).

Charges diffuses

Le bilan journalier des charges d'azote accumulées à la surface du sol est fait sur chaque carreau entier:

$$[1] \quad CN_{sol} = [CN'_{sol} + T_{sec} A + D_{por} P_{por} (1 - F_{pon}) + D_{nop} P_{nop} + D_{eng} P_{eng}] * e^{-K_D}$$

où CN_{sol} : charge d'azote accumulée à la surface du sol avant dégradation et entraînement par le ruissellement (kg)

CN'_{sol} : charge d'azote à la surface du sol à la fin du jour précédent (kg)

T_{sec} : taux moyen journalier de dépôts atmosphériques secs d'azote (kg N/km²)

A : surface du carreau entier (km²)

D_{por} : coefficient mensuel de production d'azote par les porcs

P_{por} : production moyenne journalière d'azote par les porcs sur le carreau entier (kg)

- F_{pon} : fraction ponctuelle de la production porcine d'azote
- D_{nop} : coefficient mensuel de production d'azote par les animaux différents des porcs
- P_{nop} : production moyenne journalière d'azote par les animaux différents des porcs sur le carreau entier (kg)
- D_{eng} : coefficient mensuel d'application d'azote par les engrais chimiques
- P_{eng} : quantité moyenne journalière d'azote épandu au sol par les engrais chimiques sur le carreau entier (kg)
- K_D : coefficient de dégradation du stock d'azote accumulé à la surface du sol (L/jour)

Le taux moyen journalier de dépôts atmosphériques secs d'azote (T_{sec}) est une donnée d'entrée du modèle d'azote total. Étant donné la faible fréquence de ces mesures, cette valeur sera habituellement estimée à partir d'échantillonnages régionaux. Les termes de production P_{por} et P_{nop} sont des données d'entrée évaluées en fonction de la population animale sur le bassin versant; telles que fournies par les recensements agricoles, et par la production unitaire en azote total des animaux (voir tableau 3). Le terme P_{eng} est estimé à l'aide des quantités d'engrais chimique épandues sur le bassin versant telles que fournies par les recensements agricoles (voir tableau 3). Les coefficients mensuels de production D_{por} , D_{nop} et D_{eng} sont des coefficients qui permettent de tenir compte des pratiques agricoles sur le bassin versant. Ainsi, on peut tenir compte du fait que sur un bassin versant, l'épandage d'engrais chimique et de fumier ne se fait pas durant toute l'année mais à des périodes bien déterminées. Par exemple, si l'engrais chimique est épandu seulement durant les mois d'avril et mai, les

coefficients mensuels D_{eng} seront mis à zéro pour les dix autres mois et les coefficients pour les mois d'avril et de mai seront estimés pour que l'épandage durant ces deux mois soit égal à la quantité totale annuelle. Comme les quantités sont exprimées en valeurs journalières, les coefficients pour ces deux mois seront de l'ordre de six (6).

Dans le cas des porcs, les fumiers étant semi-liquides, l'utilisateur peut aussi définir la fraction ponctuelle de la production porcine d'azote, c'est-à-dire celle qui arrive directement en rivière. Cette fraction est établie par un paramètre (F_{pon}).

Le stock d'azote à la surface du sol subit une dégradation journalière qui dépend du paramètre de dégradation (K_D). Ce paramètre est corrigé en fonction de la température de l'air à l'aide de l'équation suivante:

$$[2] \quad K_D = K_{20} \theta^{(T-20)}$$

où K_{20} : coefficient de dégradation à 20°C (1/jour)

θ : constante empirique

T : température moyenne de l'air (°C)

La valeur de la constante θ est légèrement supérieure à l'unité. Ainsi, Thomann et al. (1971) ont estimé cette constante θ entre 1.02 et 1.10 dans le cas du coefficient d'oxydation de l'azote ammoniacal, et l'ont estimé à 1.06 dans le cas du coefficient d'oxydation des nitrates. Jaworski et al. (1971) ont pour leur part obtenu une valeur de 1.19 pour le coefficient de

nitrification et 1.12 pour le coefficient d'assimilation des nitrates par les algues.

Charges ponctuelles

Les charges ponctuelles arrivent directement en rivière et sont ajoutées à la charge transitée sur chaque carreau partiel. Pour l'azote, les charges ponctuelles considérées sont celles provenant des rejets municipaux, des rejets industriels et de la production porcine ponctuelle d'azote:

$$[3] \quad CN_{pon} = CN_{mun} + CN_{ind} + P_{por} F_{pon} R_{cp}$$

où CN_{pon} : charge ponctuelle journalière d'azote total sur un carreau partiel donné (kg)

CN_{mun} : charge moyenne journalière d'azote provenant des rejets municipaux sur le carreau partiel (kg)

CN_{ind} : charge moyenne journalière d'azote provenant des rejets industriels sur le carreau partiel (kg)

P_{por} : production moyenne journalière d'azote par les porcs sur le carreau partiel (kg)

F_{pon} : fraction ponctuelle de la production porcine d'azote

R_{cp} : rapport de la surface du carreau partiel sur la surface de son carreau entier d'origine

Entrainement de la charge diffuse vers la rivière

La charge associée aux différentes formes d'écoulement sur chaque carreau entier se définit comme suit:

$$[4] \quad CN_{loc} = V_R N_R + V_H N_H + V_S N_S + V_L N_{ppt}$$

où CN_{loc} : charge journalière des différentes formes d'écoulement sur le carreau entier (kg)

V_R : volume journalier d'eau de ruissellement sur le carreau entier (milliers de m^3)

V_H : volume journalier de l'écoulement hypodermique sur le carreau entier (milliers de m^3)

V_S : volume journalier de l'écoulement souterrain sur le carreau entier (milliers de m^3)

V_L : volume journalier d'eau de débordement des lacs et marais sur le carreau entier (milliers de m^3)

N_R : concentration en azote des eaux de ruissellement (mg/L)

N_H : concentration en azote de l'écoulement hypodermique (mg/L)

N_S : concentration en azote de l'écoulement souterrain (mg/L)

N_{ppt} : concentration moyenne mensuelle en azote des précipitations (mg/L)

Dans la dernière équation, les volumes d'écoulement sont estimés par le modèle hydrologique CEQUEAU. La concentration des eaux de débordement des lacs et marais a été supposée égale à celle des précipitations. La concentration de l'écoulement hypodermique est calculée comme étant la

moyenne de celle de l'écoulement souterrain et de celle du ruissellement superficiel.

La concentration en azote des eaux de ruissellement est supposée être au moins égale à la concentration des eaux de précipitation. S'il existe, de plus, une charge d'azote au sol entraînable par ruissellement, la concentration du ruissellement est augmentée du rapport de la charge entraînée sur le volume de ruissellement:

$$[5] \quad N_R = N_{ppt} + CN_{ent}/V_R$$

où N_R : concentration en azote des eaux de ruissellement (mg/L)

N_{ppt} : concentration moyenne mensuelle en azote des précipitations (mg/L)

CN_{ent} : charge d'azote à la surface du sol entraînée par ruissellement vers la rivière (kg)

V_R : volume journalier d'eau de ruissellement sur le carreau partiel considéré (milliers de m³)

La charge d'azote entraînée par ruissellement est évaluée à chaque carreau entier en fonction de la charge accumulée et de la lame de ruissellement:

$$[6] \quad CN_{ent} = (1 - e^{-R/P63}) CN_{sol}$$

où CN_{ent} : charge d'azote à la surface du sol entraînée par ruissellement vers la rivière (kg)

CN_{sol} : charge d'azote accumulée à la surface du sol (kg)

R : lame de ruissellement journalière (mm)

P63 : lame de ruissellement entraînant 63% de la charge accumulée (mm)

Dans l'équation 6, la lame de ruissellement entraînant 63% de la charge accumulée (P63) est un paramètre du modèle d'azote total. Son effet est illustré à la figure 1. Ce paramètre qui est estimé par essais et erreurs, permet de contrôler le processus d'entraînement vers la rivière, des charges d'azote accumulées au niveau du sol. Par exemple, P63 = 10 mm implique qu'une précipitation de 10 mm entraîne en rivière 63% de la charge accumulée au niveau du sol.

Bilan et transport en rivière

La production décrite précédemment est distribuée sur chaque carreau partiel proportionnellement à sa superficie et représente la charge disponible pour le transport et la dégradation en rivière. Le bilan journalier d'azote total au niveau du carreau partiel s'exprime selon l'équation:

$$[7] \quad N = \frac{CN_{init} + CN_{am} + CN_{loc} R_{cp} + CN_{pon}}{V_{dil}} * e^{-K_D}$$

où N : concentration en azote total à l'exutoire du carreau partiel à la fin du jour simulé (mg/L)

CN_{init} : charge initiale en azote total sur le tronçon de rivière au début du jour simulé (kg)

CN_{am} : charge journalière provenant des carreaux immédiatement en amont

(kg)

CN_{loc} : charge journalière locale associée aux différentes formes d'écoulement sur le carreau entier (kg)

R_{cp} : rapport de la surface du carreau partiel sur la surface de son carreau entier d'origine

CN_{pon} : charge journalière ponctuelle sur le carreau partiel (kg)

V_{dil} : volume de dilution (milliers de m^3)

K_D : coefficient de dégradation de l'azote total corrigé en fonction de la température de l'eau à l'aide de l'équation (2).

Le volume de dilution (V_{dil}) sur chaque carreau partiel est fourni par le modèle hydrologique:

$$[8] \quad V_{dil} = V'_{cp} + V_{am} + V_{loc}$$

où:

V'_{cp} : volume d'eau contenu dans le tronçon de rivière à la fin du jour précédent, fonction du débit (milliers de m^3).

V_{am} : volume d'eau provenant des carreaux partiels immédiatement en amont pendant le jour considéré (milliers de m^3).

V_{loc} : volume d'eau produit localement sur le carreau partiel par les différentes formes d'écoulement pendant le jour considéré (milliers de M^3).

APPLICATION

L'application du modèle d'azote total nécessite en premier lieu la calibration du modèle hydrologique CEQUEAU de façon à reproduire le mieux possible les débits observés. Par la suite, on doit estimer les sources diffuses et ponctuelles d'azote et finalement ajuster les six paramètres (Θ , K_D , K_R , P_{63} , N_S , F_{PON}) relatifs à l'azote total cités précédemment. L'estimation des paramètres est faite par essais et erreurs, c'est-à-dire qu'après une première simulation, les valeurs des paramètres sont modifiées pour la simulation suivante et les résultats sont comparés. Ce processus se répète jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants. Normalement, si les données sont disponibles, on utilise deux ou trois ans d'observation pour la calibration du modèle et deux autres années pour sa vérification.

L'application a été faite sur le bassin versant de la rivière Sainte-Anne dont l'embouchure est située à La Pérade entre Trois-Rivières et Québec. Le bassin a une superficie de 2 690 km² et supporte une population d'environ 17 000 habitants. L'agriculture et l'industrie forestière y sont les principales activités et les villes de Saint-Raymond et La Pérade regroupent la majorité des quelques industries secondaires du bassin. Les concentrations en azote total utilisées sont celles mesurées à La Pérade en 1978, 1979 et 1980 par le ministère de l'Environnement du Québec. Les données de 1978 et 1979 ont servies pour la calibration du modèle, alors que les données de 1980 ont été utilisées pour la vérification de la simulation.

Les charges ponctuelles relatives aux populations et aux industries sont données aux tableaux 1 et 2. Le premier tableau donne les charges ponctuelles produites par la population humaine desservie par un égout (CN_{mun} , équation 3) alors que le second tableau fournit les charges associées aux rejets industriels (CN_{ind} , équation 3). Les charges diffuses provenant des animaux (P_{por} et P_{nop} , équation 1) sont présentées au tableau 3. Le tableau 4 précise la charge diffuse (P_{eng} , équation 1) provenant de l'épandage d'engrais chimique sur le bassin versant.

L'estimation de la concentration en azote des précipitations a été faite en utilisant les mesures effectuées par le ministère de l'Environnement du Québec à la station de la Forêt Montmorency pour les années 1981 à 1983 (tableau 5).

Les concentrations en azote total calculées (moyenne de trois jours) et les concentrations instantanées mesurées à La Pérade pour les années 1978 à 1980 sont montrées aux figures 2 à 4. Le modèle reproduit l'allure générale des concentrations observées. Dans sa forme actuelle et avec les données d'entrée utilisées, le modèle semble surestimer les concentrations en automne, plus particulièrement en septembre et octobre. De plus, on note des variations journalières importantes, en juillet 1979 et en mars 1980 non reproduites par le modèle. Ces écarts semblent attribuables au fait que les charges provenant des sources diffuses et ponctuelles d'azote sont des valeurs moyennes et que leur variabilité temporelle n'a pas été introduite. De plus, la faible fréquence des mesures en rivière limite les possibilités de calibration à l'échelle journalière.

CONCLUSION

Le modèle d'azote proposé permet de reconstituer l'allure générale des concentrations observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne. Il estime la production en azote sur le bassin versant et simule le transport en rivière, ce qui permet de calculer les concentrations à n'importe quel point. La qualité des résultats dépend toutefois de l'identification et de la quantification des sources dans le temps et l'espace. Compte tenu de la nature des sources d'azote, du peu de données disponibles et de la complexité des phénomènes impliqués, certaines hypothèses simplificatrices ont été nécessaires à l'évaluation des charges au niveau du bassin versant et à la modélisation des processus. Le modèle proposé peut être transposé à d'autres bassins versants, mais doit être recalibré sur chacun. Pour être effectivement, validé, le modèle devra être appliqué sur plusieurs bassins versants présentant des conditions d'utilisation du territoire différentes.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée avec l'aide financière du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (subvention 9164) et du Fonds pour la Formation de chercheurs et Actions Concertées (subvention 2104).

BIBLIOGRAPHIE

CLUIS, D. et DUROCHER, H. (1976). Étude 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.

CLUIS, D., COUILLARD, D. and POTVIN, L. (1979). A square grid transport model relating land use exports to nutrient loads in rivers. Water Resources Research, 15: 630-636.

CONSTABLE, T.W. (1975). A distributed quantity-quality runoff model for assessing potential impacts of alternative land use configurations. Technical report no 75-1. Water resources group, Department of civil engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario. 207 p.

COUILLARD, D. (1974). Compilation de certains rejets industriels: bilan des polluants. Rapport scientifique No 47, 246 pp. INRS-Eau, Université du Québec, Québec.

COUILLARD, D. and CLUIS, D. (1980). Generation of polluting loads within river basins. Water Research, 14: 1621-1630.

COUILLARD, D. and CLUIS, D. (1980a). Estimation of the downstream river water quality with pollution land-use data bank. Water Supply and Management, 4: 263-268.

GIRARD, G., CHARBONNEAU, R. et MORIN, G. (1972). Modèle hydrophysiographique. Symposium international sur les techniques de modèles mathématiques appliqués aux systèmes de ressources en eau, Proceedings 1: 190-205, Ottawa, 9-12 mai.

INRS-EAU: GROUPE SYSTÈME URBAIN. (1973). Systèmes urbains de distribution d'eau. Étude du système et de la demande. Rapport scientifique no 12, 49 pp. INRS-Eau, Université du Québec, Québec.

JAWORSKI, N.A., LEAR, D.W. and VILLA, O. (1971). Nutrient management in the Potomac estuary. Technical report 45. Chesapeake technical support laboratory, Middle Atlantic region, Water quality office, Environmental protection agency. 64 p.

JOHNSON, J.D. and STRAUB, C.P. (1971). Development of a mathematical model to predict the role of surface runoff and groundwater flow in overfertilization of surface waters. Bulletin no 35. Water resources research center, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota. 176 p.

McELROY, A.D., CHIU, F.Y. and ALETI, A. (1975). Analysis of nonpoint-source pollutants in the Missouri basin region. EPA-600/5-75-004. Office of research and development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 163 p.

MINISTÈRE DES APPROVISIONNEMENTS ET SERVICES (1978). Inventaire national des équipements en eau des municipalités du Canada 1977. Publication catégorie no EM44-10/1977, 339 p., Ministère des Approvisionnement et Services, Gouvernement du Canada.

MINISTÈRE DES APPROVISIONNEMENTS ET SERVICES (1981). Inventaire national des équipements en eau des municipalités du Canada 1981. Publication

catégorie no EN44-10/81, 389 p., Ministère des Approvisionnements et services, Gouvernement du Canada.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC (1984). Réseau d'échantillonnage des précipitations du Québec: Sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1981-1982-1983. Direction générale des inventaires et de la recherche, Service de la qualité des eaux. Publication PA-11, 163 p., Ministère de l'Environnement du Québec.

MORIN, G., CHARBONNEAU, R. et GIRARD, G. (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 1975. Vol. 115, pp. 176-184.

MORIN, G., FORTIN, J.P., LARDEAU, J.P., SOCHANSKA, W. et PAQUETTE, S. (1981). Modèle CEQUEAU: manuel d'utilisation. Rapport scientifique no 93. 449 p., INRS-Eau, Université du Québec, Québec.

MORIN G., CLUIS D., COUILLARD D., JONES H.G. et GAUTHIER J.M. (1983a) Modélisation de la température de l'eau à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU. Rapport scientifique No. 153, 103 pp. INRS-Eau, Université du Québec, Québec.

MORIN G., COUILLARD D., CLUIS D., JONES H.G. et DUPONT J. (1983b) Modélisation des solides en suspension à l'aide du modèle

quantité-qualité CEQUEAU. Rapport scientifique No. 154, 124 pp.
INRS-Eau, Université du Québec, Québec.

MORIN G., CLUIS D., COUILLARD D., JONES H.G. et GAUTHIER J.M. (1984a)
Modélisation de l'oxygène dissous et de la demande biochimique en
oxygène à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU. Rapport
scientifique No. 155, 160 pp. INRS-Eau, Université du Québec, Québec.

MORIN G., COUILLARD D., CLUIS D. JONES H.G. et GAUTHIER J.M. (1984b)
Modélisation des solides dissous à l'aide du modèle quantité-qualité
CEQUEAU. Rapport scientifique No. 160, 127 pp. INRS-Eau, Université
du Québec, Québec

MORIN G., CLUIS D., COUILLARD D., JONES H.G. et GAUTHIER J.M. (1985)
Modélisation de l'azote total à l'aide du modèle quantité-qualité
CEQUEAU. Rapport scientifique No. 180, 213 pp. INRS-Eau, Université
du Québec, Québec.

MORIN, G., COUILLARD, D., CLUIS, D., JONES, H.G. and GAUTHIER, J.M. (1986a).
Modélisation des solides dissous en rivière à l'aide des composantes de
l'écoulement. Canadian Journal of Civil Engineering, 13(2): 196-202.

MORIN, G., COUILLARD, D., CLUIS, D., JONES, H.G. and GAUTHIER, J.M. (1986b).
Prévision des températures de l'eau en rivière à l'aide d'un modèle
conceptuel. Journal des sciences hydrologiques 32(1): 1-11.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. (1978). Nitrates: an environmental assessment. Washington, D.C.

OPDQ (1979). Banque de données statistiques par bassin géographique. Office de planification et de développement du Québec. Éditeur officiel du Québec. 252 p.

SAIN, P., ROBINSON, J.B., STAMMERS, W.N., KAUSHIK, N.K. and WHITELEY, H.R. (1977). A laboratory study of the role of stream sediment in nitrogen loss from water. Journal of Environmental quality, 6: 274-278.

SCOTT'S INDUSTRIAL DIRECTORIES. (1980). Répertoire industriel du Québec. 10e éd. P.M.

STATISTIQUE CANADA. (1982a). Recensement du Canada de 1981 - Population - Répartition géographique - Québec. Ministère des Approvisionnements et Services Canada. Publication catalogue no 93-905, vol. 2, série provinciale.

STATISTIQUE CANADA. (1982b). Recensement du Canada de 1981 - Agriculture - Données municipales de la banque CANSIM. Ministère des Approvisionnements et Services Canada, Service d'aide aux utilisateurs, Montréal.

STEWART, W.D.P., PRESTON, T., PETERSON, H.G. and CHRISTOFI, N. (1982). Nitrogen cycling in eutrophic freshwaters. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Biological Sciences, 296: 491-509.

THOMANN, R.V., O'CONNOR, D.J. and DI TORO, D.M. (1971). Effect of nitrification on the dissolved oxygen of streams and estuaries. In: Mathematical modeling of natural systems. Environmental Engineering Sciences Program, Manhattan College, Bronx, New York. 380 p.

VAN KESSEL, J.F. (1977). Factors affecting the denitrification rate in two water-sediment systems. Water Research, 11: 259-267.

ZISON, S.W., MILLS, W.B., DEIMER, D. and CHEN, C.W. (1978). Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling. EPA-600/3-78-105. Environmental research laboratory, Office of research and development, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. 317 p.

TABLEAU 1: Production ponctuelle journalière en azote total de la population humaine sur le bassin de la rivière Sainte-Anne répartie par carreau partiel (CP) (Statistique Canada, 1982a; OPDQ, 1979; Ministère des Approvisionnements et Services, 1978, 1981).

| RÉFÉRENCES | | LIEU | POPULATION | PRODUCTION* (kg N/jour) |
|------------|---------|------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| CP | IJ | | DESSERVIE PAR UN ÉGOUT | |
| 1 | 12 11 A | La Pérade - village | 1 039 | 32 |
| | | Ste-Anne-de-la-Pérade - paroisse | 1 218 | |
| | | TOTAL | 2 257 | |
| 2 | 11 11 A | St-Prosper-de-Champlain - paroisse | 454 | 6 |
| 3 | 12 12 A | St-Casimir - village | 1 042 | 23 |
| | | St-Casimir - paroisse | - | |
| | | St-Casimir-est - village | 362 | |
| | | St-Thuribe - paroisse | 226 | |
| TOTAL | 1 630 | | | |
| 6 | 13 12 A | St-Alban - village | 673 | 9 |
| | | St-Alban - paroisse | - | |
| | | TOTAL | 673 | |
| 7 | 11 13 A | St-Ubalde sd | 281 | 4 |
| 16 | 14 13 A | Ste-Christine - paroisse | 94 | 1 |
| 18 | 14 14 B | St-Léonard-de-Portneuf sd | 191 | 3 |
| 27 | 15 14 A | St-Raymond - ville | 3 551 | 63 |
| | | St-Raymond - paroisse | 942 | |
| | | TOTAL | 4 493 | |

* production unitaire en azote total utilisée: 0.014 kg/jour/personne (Cluis et Durocher, 1976)

TABLEAU 2: Estimations des productions journalières moyennes en azote total des industries sur le bassin de la rivière Sainte-Anne réparties par carreau partiel (CP) (Scott's Industrial Directories, 1980; Couillard, 1974; INRS-Eau - Groupe Système Urbain, 1973).

| RÉFÉRENCES | | LIEU | INDUSTRIE | EMPLOYÉS | CONSOMMATION D'EAU* (l/jour/employé) | CONC. DE L'EFFLUENT* (mg/l) | PRODUCTION (kg N/jour) |
|-----------------|---------|------------------------|--------------------------|----------|--|-----------------------------------|---------------------------|
| CP | IJ | | | | | | |
| 1 | 12 11 A | Ste-Anne-de-la-Pérade | laiterie | 83 | 3 593 | 53 | 16 |
| | | | bonbons | 2 | 1 109 | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | boulangerie | 4 | 1 001 | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | margarine | 28 | 3 593 | 10 | 1 |
| | | | confection vêtements | 45 | 1 360 | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | moulée | 2 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | produits métal | 10 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| Total: 17 | | | | | | | |
| 3 | 12 12 A | St-Casimir | équipement scierie | 20 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | tuyaux béton | 4 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | planage bois | 3 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | contre-plaqué | 67 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | moulée | 13 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| Total: ~ 0 | | | | | | | |
| 6 | 13 12 A | St-Alban | beurre | 7 | 3 593 | 53 | 1 |
| | | | bois brut | 15 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | bois sciage | 6 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | équipements hydrauliques | 7 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| Total: 1 | | | | | | | |
| 7 | 11 13 A | St-Ubalde | boulangerie | 13 | 1 001 | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | confection vêtements | 60 | 1 360 | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | bois construction | 12 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | bois sciage | 15 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| Total: ~ 0 | | | | | | | |
| 16 | 14 13 A | Ste-Christine | charbon bois | 11 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| 18 | 14 14 B | St-Léonard-de-Portneuf | portes chassis | 2 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | démarrateurs générateurs | 4 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | charpentes bois | 3 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | bois construction | 12 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| Total: ~ 0 | | | | | | | |
| 27 | 15 14 A | St-Raymond | charbon bois | 10 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | charbon bois | 12 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | fromagerie | 4 | 3 593 | 53 | 1 |
| | | | imprimerie | 6 | 68 | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | imprimerie | 1 | 68 | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | planage bois | 30 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | papier journal | 150 | 11 050 | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | bois sciage | 40 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | laiterie | 50 | 3 593 | 53 | 10 |
| | | | gants | 20 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | sciure bois, savon | 3 | 500 | 35 | ~ 0 |
| | | | armoires bois | 6 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | meubles et bois | 200 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | bois sciage | 50 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| | | | béton, gravier | 100 | - | ~ 0 | ~ 0 |
| traitement bois | 12 | - | ~ 0 | ~ 0 | | | |
| Total: 11 | | | | | | | |

* valeurs estimées

TABLEAU 3: Production en azote total des populations animales sur le bassin de la rivière Sainte-Anne ventilée sur les carreaux entiers (CE) (Statistique Canada, 1982b).

| RÉFÉRENCES | | POPULATION ESTIMÉE | | | | PRODUCTION* (kg N/jour) | |
|------------|-------|--------------------|--------|---------|---------|-------------------------|--------|
| CE | IJ | PORCS | BOVINS | CHEVAUX | POULETS | PORCS | AUTRES |
| 1 | 12 11 | - | 1 518 | 20 | 200 | - | 287 |
| 2 | 11 11 | - | 501 | 24 | 31 | - | 98 |
| 3 | 12 12 | 50 | 3 600 | 21 | 334 | 2 | 677 |
| 4 | 11 12 | 717 | 1 635 | 48 | 190 | 22 | 314 |
| 5 | 12 13 | 26 | 2 054 | 12 | 181 | 1 | 386 |
| 6 | 13 12 | - | 1 366 | 6 | 148 | - | 257 |
| 7 | 11 13 | 597 | 1 518 | 17 | 169 | 19 | 286 |
| 8 | 12 14 | - | 951 | 9 | 90 | - | 179 |
| 9 | 13 13 | 516 | 1 457 | 9 | 177 | 16 | 274 |
| 10 | 11 14 | - | 140 | 2 | 11 | - | 27 |
| 11 | 12 15 | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 13 14 | 1 153 | 217 | 6 | 21 | 36 | 41 |
| 13 | 14 13 | 577 | 122 | 4 | 18 | 18 | 23 |
| 14 | 14 14 | 791 | 394 | 9 | 1 351 | 25 | 78 |
| 15 | 15 13 | - | - | - | - | - | - |
| 16 | 13 15 | - | 648 | 10 | 20 | - | 123 |
| 17 | 14 15 | 10 | 309 | 5 | 6 697 | - | 72 |
| 18 | 15 14 | 8 | 155 | 2 | 5 357 | - | 40 |
| 19 | 13 16 | 5 | 92 | 1 | 3 348 | - | 24 |
| 20 | 15 15 | 14 | 257 | 4 | 9 375 | - | 67 |
| 21 | 14 16 | 8 | 147 | 2 | 5 357 | - | 39 |
| 22 | 15 16 | 11 | 202 | 3 | 7 366 | - | 53 |
| 23 | 16 15 | 4 | 73 | 1 | 2 679 | - | 19 |
| 24 | 16 16 | 3 | 55 | 1 | 2 009 | - | 14 |
| 25 | 15 17 | - | - | - | - | - | - |
| 26 | 16 17 | - | - | - | - | - | - |
| 27 | 17 16 | - | - | - | - | - | - |
| 28 | 14 17 | 6 | 110 | 2 | 4 018 | - | 29 |
| 29 | | - | - | - | - | - | - |
| à | | | | | | | |
| 43 | | | | | | | |

* productions unitaires en azote total utilisées: 0.031 kg/jour par porc; 0.187 kg/jour par bovin; 0.159 kg/jour par cheval; 0.002 kg/jour par poulet (Cluis et Durocher, 1976)

TABLEAU 4: Moyenne journalière d'azote total provenant des engrais chimiques épanché sur chaque carreau partiel (CP) (Statistique Canada, 1982b).

| RÉFÉRENCES | | QUANTITÉ ANNELLE D'ENGRAIS ÉPANDUS | MOYENNE JOURNALIÈRE D'AZOTE ÉPANDU* |
|------------|-------|---------------------------------------|--|
| CE | IJ | (tonnes) | (kg N/jour) |
| 1 | 12 11 | 301 | 124 |
| 2 | 11 11 | 87 | 36 |
| 3 | 12 12 | 466 | 192 |
| 4 | 11 12 | 386 | 159 |
| 5 | 12 13 | 764 | 314 |
| 6 | 13 12 | 292 | 120 |
| 7 | 11 13 | 873 | 359 |
| 8 | 12 14 | 312 | 128 |
| 9 | 13 13 | 487 | 200 |
| 10 | 11 14 | 97 | 40 |
| 11 | 12 15 | - | - |
| 12 | 13 14 | 172 | 71 |
| 13 | 14 13 | 71 | 29 |
| 14 | 14 14 | 117 | 48 |
| 15 | 15 13 | - | - |
| 16 | 13 15 | 251 | 103 |
| 17 | 14 15 | 58 | 24 |
| 18 | 15 14 | 18 | 7 |
| 19 | 13 16 | 18 | 7 |
| 20 | 15 15 | 55 | 23 |
| 21 | 14 16 | 18 | 7 |
| 22 | 15 16 | 55 | 23 |
| 23 | 16 15 | 18 | 7 |
| 24 | 16 16 | 18 | 7 |
| 25 | 15 17 | - | - |
| 26 | 16 17 | - | - |
| 27 | 17 16 | - | - |
| 28 | 14 17 | 18 | 7 |
| 29 | | - | - |
| à | | | |
| 43 | | | |

* en supposant un contenu moyen de 15% d'azote total dans les engrais chimiques

TABLEAU 5: Concentrations (mg/l N) en azote mesurées dans les précipitations à la station de Forêt Montmorency pour les années 1981, 1982 et 1983 (Ministère de l'Environnement du Québec, 1984).

| | NO _x * | | | NH ₄ | | | TOTAL | | | |
|-----------|-------------------|------|------|-----------------|------|------|-------|------|------|---------|
| | 81 | 82 | 83 | 81 | 82 | 83 | 81 | 82 | 83 | moyenne |
| janvier | - | 0.26 | 0.26 | - | 0.03 | 0.08 | - | 0.29 | 0.34 | 0.32 |
| février | - | 0.29 | 0.28 | - | 0.04 | 0.08 | - | 0.33 | 0.36 | 0.35 |
| mars | - | 0.52 | 0.08 | - | 0.18 | 0.02 | - | 0.70 | 0.10 | 0.40 |
| avril | - | 0.46 | 0.15 | - | 0.26 | 0.09 | - | 0.72 | 0.24 | 0.48 |
| mai | - | 0.38 | 0.31 | - | 0.36 | 0.22 | - | 0.74 | 0.53 | 0.64 |
| juin | - | 0.28 | 0.29 | - | 0.24 | 0.46 | - | 0.52 | 0.75 | 0.64 |
| juillet | - | 0.21 | 0.24 | - | 0.20 | 0.28 | - | 0.41 | 0.52 | 0.47 |
| août | - | 0.24 | 0.42 | - | 0.21 | 0.52 | - | 0.45 | 0.94 | 0.70 |
| septembre | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.22 | 0.37 | 0.30 | 0.46 | 0.60 | 0.53 | 0.53 |
| octobre | 0.33 | 0.38 | 0.28 | 0.11 | 0.34 | 0.20 | 0.44 | 0.72 | 0.48 | 0.55 |
| novembre | 0.29 | 0.65 | 0.18 | 0.05 | 0.26 | 0.08 | 0.34 | 0.91 | 0.26 | 0.50 |
| décembre | 0.27 | 0.39 | 0.20 | 0.06 | 0.14 | 0.02 | 0.33 | 0.53 | 0.22 | 0.36 |

* NO₃+NO₂

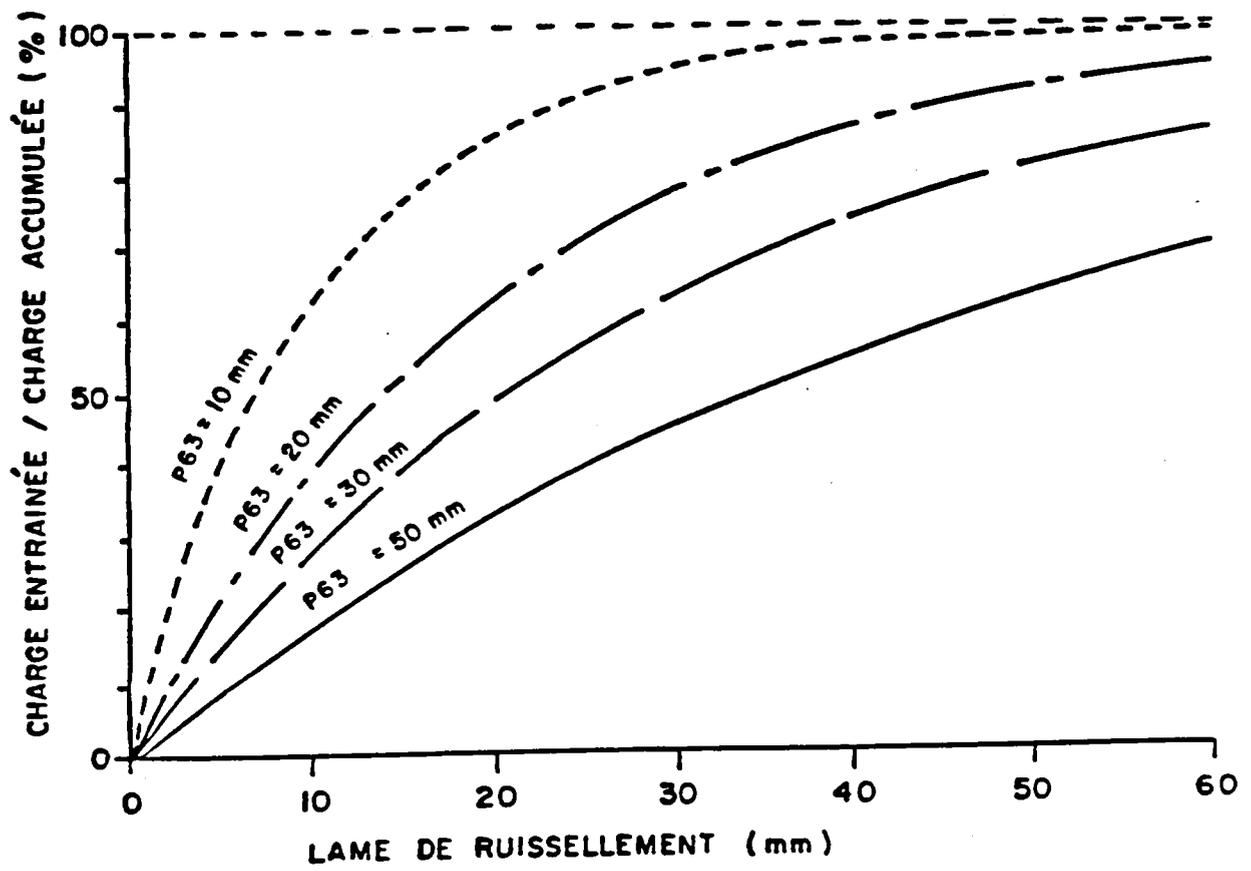


Figure 1: Effet du paramètre (P63) d'entrainement de la charge accumulée.

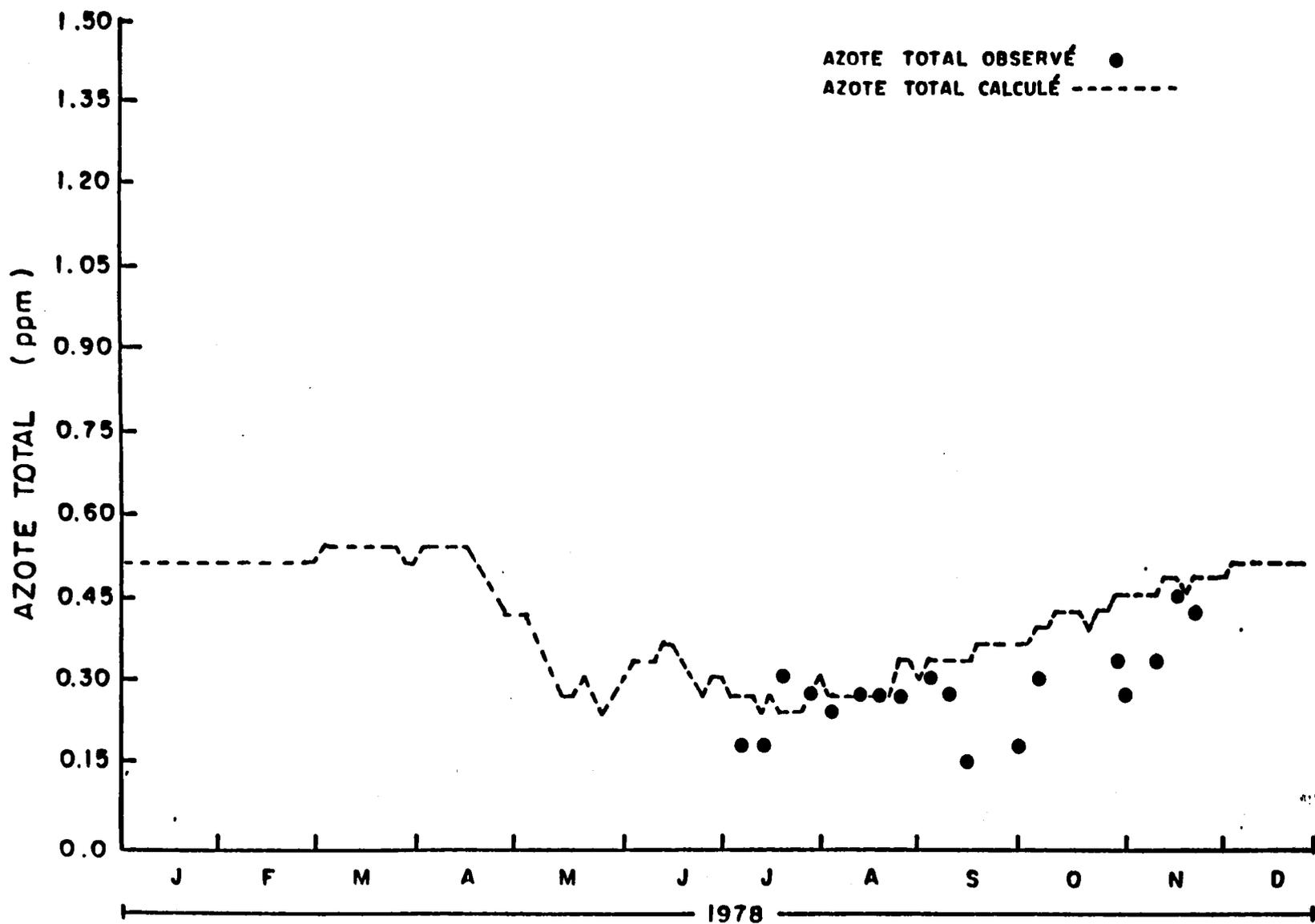


Figure 2: Concentrations en azote total calculées (moyenne de trois jours) et mesurées à La Pérade en 1980.

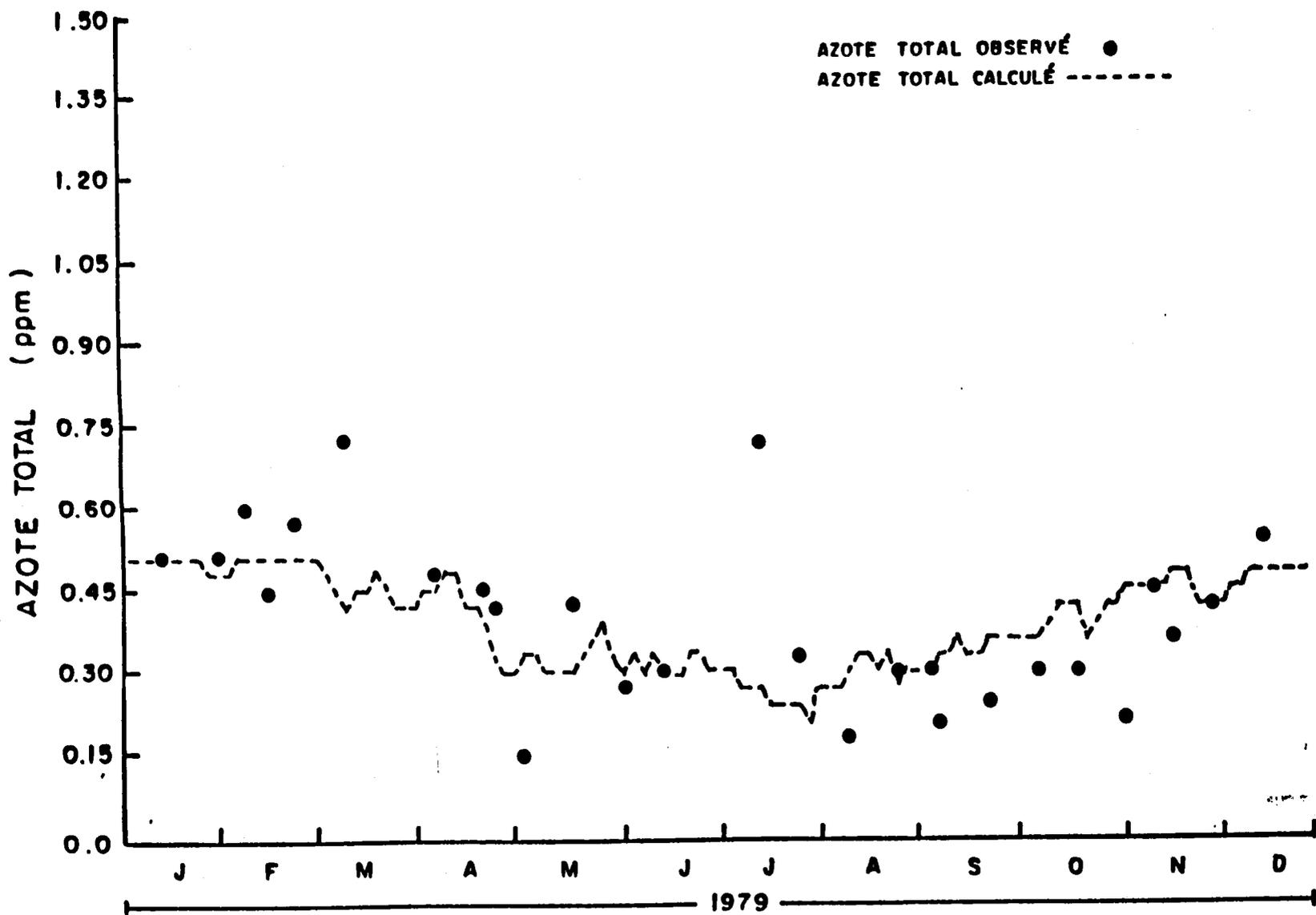


Figure 3: Concentrations en azote total calculées (moyenne de trois jours) et mesurées à La Pérade en 1979.

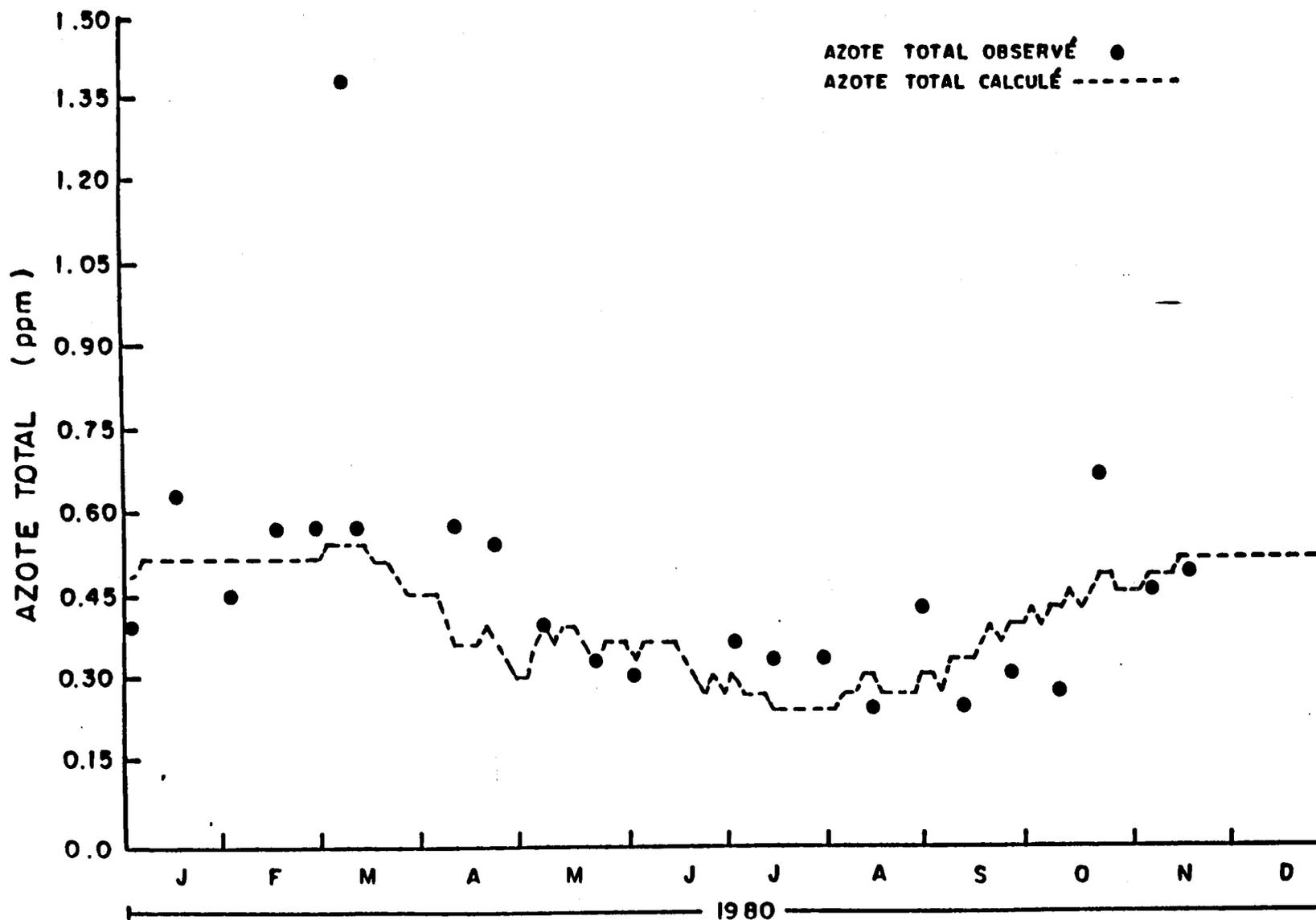


Figure 4: Concentrations en azote total calculées (moyenne de trois jours) et mesurées à La Pérade en 1978.