

Record Number:

Author, Monographic: Couillard, D.//Cluis, D.//Jones, H. G.//Morin, G.//Bédard, Y.//Gauthier, J. M.

Author Role:

Title, Monographic: Modélisation des sulfates à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU

Translated Title:

Reprint Status:

Edition:

Author, Subsidiary:

Author Role:

Place of Publication: Québec

Publisher Name: INRS-Eau

Date of Publication: 1987

Original Publication Date: Mai 1987

Volume Identification:

Extent of Work: xii, 91

Packaging Method: pages incluant 2 annexes

Series Editor:

Series Editor Role:

Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche

Series Volume ID: 205

Location/URL:

ISBN: 2-89146-203-3

Notes: Rapport annuel 1986-1987

Abstract: 15.00\$

Call Number: R000205

Keywords: rapport/ ok/ dl

INRS-EAU
C.P. 7500
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4C7

**MODÉLISATION DES SULFATES À L'AIDE
DU MODÈLE QUANTITÉ-QUALITÉ CEQUEAU**

Rapport scientifique no 205

par

D. Couillard
D. Cluis
H.G. Jones
G. Morin
Y. Bédard
J.M. Gauthier

Mai 1987

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
Introduction	1
Chapitre 1 : Aperçu du cycle du soufre dans l'écosystème	2
Chapitre 2 : Modélisation des sulfates dans les eaux douces: travaux antécédents	5
Chapitre 3 : Intégration de la sous-routine de modélisation des sulfates au modèle hydrologique CEQUEAU	9
3.1 Structure de support	9
3.2 Sous-routine de simulation des concentrations de sulfates en rivière	10
3.2.1 Calcul de la concentration en sulfates des eaux à l'exutoire des carreaux partiels (COS_{ex})	11
3.2.2 Fonction de production [$(CHS_{loc} * R_{cp})$ et CHS_{pon}]	13
3.2.2.1 Calcul de la charge diffuse produite sur le bassin pour chaque carreau entier (CHS_{loc})	13
3.2.2.2 Calcul de la charge ponctuelle en sulfates produite sur chaque carreau partiel (CHS_{pon})...	24
3.2.3 Fonction de transfert (CHS_{init} et CHS_{am})	24
3.2.3.1 Calcul des charges en sulfates initialement présentes sur les carreaux partiels (CHS_{init})	24
3.2.3.2 Calcul de la charge en sulfates provenant des carreaux partiels en amont (CHS_{am})	26
Chapitre 4 : Ajustement du modèle	28
4.1 Méthode d'estimation des données d'entrée	28
4.1.1 Estimation de la concentration en sulfates des précipitations humides (COS_{ppt})	28
4.1.2 Estimation de la charge en sulfates apportée par les dépôts secs (CHS_{DS})	28

4.1.3	Estimation des apports de charge en sulfates d'origine industrielle (CHS_{ind})	30
4.1.4	Estimation de la charge en sulfates originant des égouts municipaux (CHS_{mun})	32
4.1.5	Estimation des charges en sulfates provenant des fumiers et purins (PS_{ani})	34
4.1.6	Estimation des charges en sulfates provenant des engrais chimiques (PS_{eng})	35
4.1.7	Estimation de la concentration en sulfates des eaux souterraines (COS_p)	36
4.2	Valeurs estimées des données d'entrée du modèle pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne	36
4.2.1	Estimation de COS_{PPT} pour le bassin de la rivière Sainte-Anne	36
4.2.2	Estimation de CHS_{DS} pour le bassin de la rivière Sainte-Anne	38
4.2.3	Estimation de CHS_{ind} pour le bassin de la rivière Sainte-Anne	38
4.2.4	Estimation de CHS_{mun} pour le bassin de la rivière Sainte-Anne	38
4.2.5	Estimation de PS_{ani} pour le bassin de la rivière Sainte-Anne	46
4.2.6	Estimation de PS_{eng} pour le bassin de la rivière Sainte-Anne	46
4.2.7	Estimation de COS_p pour le bassin de la rivière Sainte-Anne	46
4.2.8	Estimation de D_{ani} et D_{eng} pour le bassin de la rivière Sainte-Anne	46
4.3	Valeurs de départ des paramètres CX_F , a , b , M_{SOL} , θ , $K_{S_{20}}$, K_D et P_{nap} suggérées pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne	50
4.4	Calibration du modèle et résultats	50
Conclusions		65
Références		66
Annexe I : Résumé des équations et variables du modèle		74
Annexe II : Déroulement de la sous-routine et correspondance des variables du modèle et des variables informatiques		85

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Pages</u>
Tableau 1 : Vitesses moyennes mensuelles de déposition de SO_2 (v_{SO_2}) et SO_4 particulaire (v_{SO_4}) obtenues à partir des données des stations APN de ELA, Long Point, Chalk River et Kejimikujik	31
Tableau 2 : Estimés des concentrations potentielles en sulfates des effluents non-traités et des consommations d'eau par employé pour différents types d'industries	33
Tableau 3 : Concentrations moyennes en sulfates des eaux souterraines (CO_{S_p}) mesurées pour différentes régions géologiques du Québec	37
Tableau 4 : Calcul des concentrations moyennes mensuelles pondérées en sulfates des précipitations à la station du REPQ à la Forêt Montmorency de 1981 à 1983	39
Tableau 5 : Calcul des concentrations moyennes mensuelles pondérées en sulfates des précipitations à la station du REPQ à Sainte-Catherine de 1981 à 1983	40
Tableau 6 : Estimé de la concentration moyenne mensuelle en sulfates des précipitations ($CO_{S_{PPT}}$) sur le bassin versant de la rivière Sainte-Anne à partir des mesures de qualité des précipitations des stations du REPQ à la forêt Montmorency et à Sainte-Catherine de Portneuf de 1981 à 1983	41
Tableau 7 : Évaluation de la charge moyenne mensuelle en sulfates apportée par les dépôts secs à la station APN de la forêt Montmorency ($CH_{S_{DS}}$)	42
Tableau 8 : Estimation des productions journalières moyennes en sulfates des industries sur le bassin de la rivière Sainte-Anne par carreau partiel	43-44
Tableau 9 : Production ponctuelle potentielle journalière en sulfates de la population humaine sur le bassin de la rivière Sainte-Anne répartie par carreau partiel	45
Tableau 10: Production potentielle de sulfates des populations animales sur le bassin de la rivière Sainte-Anne, ventilée sur les carreaux entiers	47
Tableau 11: Estimation des charges moyennes journalières de sulfates (PS_{eng}) provenant des engrais chimiques épandus sur chaque carreau entier (CE) du bassin versant de la rivière Sainte-Anne	48

LISTE DES TABLEAUX (suite)

	<u>Pages</u>
Tableau 12: Estimation de la concentration en sulfates des eaux souterraines (CO_{S_p}) se trouvant sur le bassin versant de la rivière Sainte-Anne d'après l'origine des eaux souterraines	49
Tableau 13: Estimés des coefficients mensuels d'épandage des fumiers (D_{ani}) et des engrais chimiques (D_{eng}) sur le bassin de la rivière Sainte-Anne	51
Tableau 14: Concentration (ppm) moyenne mensuelle de sulfates observée et calculée à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour les années 1975 à 1980	64

LISTE DES FIGURES

	<u>Pages</u>
Figure 4.1: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1975	58
Figure 4.2: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1976	59
Figure 4.3: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1977	60
Figure 4.4: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1978	61
Figure 4.5: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1979	62
Figure 4.6: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1980	63

NOMENCLATURE

Définition des variables du modèle

- a : coefficient de l'équation de Freundlich;
- b : coefficient de l'équation de Freundlich;
- CE_i : consommation journalière d'eau par employé pour le type d'industrie i (l/pers);
- CHS_{am} : charge en sulfates journalière provenant des carreaux partiels immédiatement en amont (kg);
- CHS_{atm} : charge en sulfates journalière d'origine atmosphérique parvenant au sol sur un carreau entier (kg);
- CHS_{DS} : charge en sulfates journalière provenant des dépôts secs (kg);
- CHS_{ent} : charge en sulfates journalière du sol entraînée par ruissellement sur un carreau entier (kg);
- CHS_F : charge en sulfates journalière libérée par la fonte du couvert de neige sur un carreau entier (kg);
- CHS_{ind} : charge en sulfates journalière moyenne provenant de rejets industriels sur le carreau partiel (kg);
- CHS_{init} : charge en sulfates journalière initiale sur le tronçon de rivière au début du jour (kg);
- CHS_{loc} : charge en sulfates journalière locale apportée par les différentes formes d'écoulement sur un carreau entier (kg);
- CHS_{mun} : charge en sulfates journalière moyenne provenant de rejets municipaux sur le carreau partiel (kg);
- CHS_{N_j} : charge en sulfates du couvert de neige pour le jour de simulation (kg);
- CHS_N^o : charge en sulfates du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte (kg);

- $CHS_{N\ j-1}$: charge en sulfates du couvert de neige le jour précédent (kg);
- CHS_{pon} : charge en sulfates journalière d'origine ponctuelle sur un carreau partiel (kg);
- CHS_{PPT} : charge en sulfates journalière moyenne des précipitations sur l'ensemble du bassin versant (kg);
- CHS_{sol} : charge en sulfates journalière accumulée dans et sur le sol, disponible pour être entraînée par les eaux (kg);
- CHS_{sol_0} : charge en sulfates journalière accumulée dans et sur le sol à la fin du jour précédent, après lessivage (kg);
- CHS'_{sol} : charge en sulfates journalière accumulée dans le sol à la fin du jour, après lessivage (kg);
- COS_{eq} : concentration en sulfates à l'équilibre de l'eau du sol en surface (mg/l);
- COS_{ex} : concentration en sulfates à l'exutoire d'un carreau partiel à la fin du jour (mg/l);
- $COS_{ex\ i}$: concentration en sulfates à l'exutoire du carreau partiel "i" en amont (mg/l);
- $COS_{ex\ j-1}$: concentration en sulfates à l'exutoire d'un carreau partiel à la fin du jour précédent (mg/l);
- COS_F : concentration en sulfates des eaux de fonte (mg/l);
- COS_H : concentration en sulfates de l'écoulement hypodermique (mg/l);
- $COS_{ind\ i}$: concentration en sulfates moyenne de l'effluent industriel "i" (mg/l);

- COS_N^o : concentration en sulfates du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte continu (mg/l);
- COS_{PPT} : concentration en sulfates des précipitations journalières (mg/l);
- COS_P : concentration en sulfates des eaux souterraines profonde sur le carreau entier (mg/l);
- COS_S : concentration moyenne en sulfates de l'écoulement souterrain (mg/l);
- CX_F : coefficient d'ajustement de la concentration en sulfates des eaux de fonte (environ 1.0);
- D_{ani} : coefficient mensuel de production de fumier par les animaux;
- D_{eng} : coefficient mensuel d'épandage des engrais chimiques;
- H_F : lame journalière d'eau de fonte (mm);
- $H_{N j}$: équivalence en eau du couvert de neige pour le jour de simulation (mm);
- $H_{N j-1}$: équivalence en eau du couvert de neige pour le jour précédent (mm);
- H_N^o : équivalence en eau du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte continu (mm);
- H_{PPT} : lame journalière de précipitation sur le carreau entier (mm);
- H_{PPTeff} : lame journalière de précipitation efficace (non retenue dans le couvert de neige) (mm);
- H_{PPTret} : lame journalière de précipitation retenue dans le couvert de neige (mm);
- ind : nombre d'industries sur un carreau partiel;
- j : jour de simulation;
- K_D : coefficient de disparition des sulfates en rivière (j^{-1});

- K_F : coefficient de lessivage des sulfates du couvert de neige lors d'un épisode de fonte continu sur un carreau entier (mm^{-1});
- K_S : coefficient de déperdition des sulfates accumulés dans le sol à la température T (j^{-1});
- $K_{S_{20}}$: coefficient de déperdition des sulfates accumulés dans le sol à 20°C (j^{-1});
- L : longueur du tronçon de rivière sur le carreau partiel (km);
- M_{sol} : masse moyenne de sol agissant comme réservoir de sulfates, par unité de surface (kg/m^2);
- n : nombre de carreaux partiels en amont;
- N_{bov} : population de bovins sur un carreau entier (animaux);
- N_{che} : population de chevaux sur un carreau entier (animaux);
- N_{hum} : population humaine sur un carreau entier (personnes);
- N_{por} : population de porcs sur un carreau entier (animaux);
- N_{pou} : population de poulets sur un carreau entier (animaux);
- NE_i : nombre d'employés dans l'industrie "i" (personnes);
- P : profondeur minimale du tronçon de rivière (m);
- PS_{ani} : production moyenne journalière potentielle de sulfates par les animaux sur un carreau entier (kg);
- P_{nap} : paramètre d'ajustement de la contribution des eaux souterraines profondes (entre 0.0 et 1.0);
- PM_{SO_4} : poids moléculaire de SO_4 (g mol^{-1});
- PM_{SO_2} : poids moléculaire de SO_2 (g mol^{-1});

- PS_{eng} : production moyenne journalière potentielle des sulfates par les engrais chimiques épandus sur un carreau entier (kg);
- PUS_{bov} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un bovin (kg/animal);
- PUS_{che} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un cheval (kg/animal);
- PUS_{hum} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un humain (kg/pers.);
- PUS_{por} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un porc (kg/animal);
- PUS_{pou} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un poulet (kg/animal);
- PUS_{sel} : charge moyenne journalière de sulfates apportée par l'épandage de sel de déglçage (kg/personne);
- R_{cp} : rapport de la surface du carreau partiel sur la surface du carreau entier;
- S_{CE} : surface réelle du carreau entier (km²);
- S_N : surface recouverte de neige sur le carreau entier (km²);
- $[SO_2]_{air}$: concentration de SO₂ dans l'air (g/m³);
- $[SO_4]_{air}$: concentration de SO₄ particulaire dans l'air (g/m³);
- S_{sol} : surface de sol sur un carreau entier (km²);
- Δt : pas de temps de la simulation (j);
- T : température du sol en surface (°C);

- v_{SO_2} : vitesse de déposition de SO_2 (mm/j);
- v_{SO_4} : vitesse de déposition de SO_4 particulaire (mm/j);
- V_{am} : volume d'eau journalier provenant des carreaux partiels en amont (milliers de m^3);
- V'_{cp} : volume d'eau du tronçon de rivière sur le carreau partiel à la fin du jour précédent (milliers de m^3);
- V_{dil} : volume d'eau total de dilution sur chaque carreau partiel (milliers de m^3);
- V_H : volume d'eau journalier de l'écoulement hypodermique (milliers de m^3);
- V_i : volume d'eau journalier provenant du carreau partiel "i" en amont (milliers de m^3);
- V_L : Volume journalier des eaux de débordement des lacs et marais sur un carreau entier (milliers de m^3);
- V_{loc} : volume journalier des différents écoulements sur un carreau partiel (milliers de m^3);
- V_R : volume journalier des eaux de ruissellement sur un carreau entier (milliers de m^3);
- V_S : volume journalier de l'écoulement souterrain sur un carreau entier (milliers de m^3);
- V'_{var} : volume d'eau accumulé à la fin du jour précédent sur le carreau partiel variant en fonction du débit (milliers de m^3);

W : largeur du tronçon de rivière (m);

θ : constante empirique pour la correction du coefficient de déperdition des sulfates au sol selon la température (légèrement supérieure à 1,0).

INTRODUCTION

Les précipitations acides constituent une des questions environnementales de l'heure qui se retrouve souvent au centre de plusieurs débats. Parmi les moyens proposés pour venir à bout de ce problème, les gouvernements fédéral et provinciaux se sont mis d'accord pour faire diminuer, partout au Canada, les émissions d'oxydes de soufre dans l'atmosphère qu'on identifie comme principal responsable du problème. On envisage ainsi une réduction de 50% des émissions de SO₂ au Canada d'ici 1994 (Caccia, 1984). Cependant, certaines questions peuvent se poser, à savoir si les niveaux supérieurs suggérés sont suffisamment bas pour que les impacts négatifs sur le milieu soient minimisés ou à quels changements de la qualité des eaux de surface acidifiées peuvent se produire à court et à long terme. L'utilité d'un modèle prédictif de la qualité des eaux de surface apparaît donc de façon plus claire.

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact des précipitations acides sur les eaux de surface, il est reconnu que le niveau des sulfates dans ces eaux est l'indice qui donne la meilleure idée de leur degré d'acidification. De plus, les sulfates sont associés à un des effets particulièrement néfastes de l'acidification des précipitations, à savoir le lessivage des cations basiques Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ (Overrein et al., 1980; Wiklander, 1980; Cronan, 1980; Wiklander, 1975). Ceci justifie donc l'intérêt d'une sous-routine permettant la modélisation des concentrations de sulfates dans le cadre du modèle quantité-qualité CEQUEAU (Morin et al., 1985, 1984a, 1984b, 1983a; 1983b et 1981).



CHAPITRE 1

APERÇU DU CYCLE DU SOUFRE DANS L'ÉCOSYSTÈME

Dans le milieu naturel, le soufre se trouve principalement dans l'écosystème terrestre sous forme de sulfures (pyrite), de sulfates (gypse), et dans l'écosystème aquatique, plus précisément dans les océans, sous forme d'ions sulfates (Garrels et al., 1975; CNRC, 1977). Des ions sulfates se retrouvent aussi naturellement dans les eaux douces par l'altération des roches renfermant du soufre. Du soufre, sous forme de SO_4^{2-} (particules ou H_2SO_4 gazeux), de H_2S et de SO_2 , est aussi présent dans l'atmosphère, dans une proportion moins élevée que dans les réservoirs terrestre et océanique, produit ou amené principalement par la consommation de combustibles fossiles, les éruptions volcaniques, les embruns marins, la dégradation de la matière organique.

Une certaine quantité de soufre est également accumulée dans la biosphère, dans la matière organique, notamment dans les protéines. Le soufre est effectivement considéré comme élément mineur, mais non moins essentiel, dans la nutrition des êtres vivants. Certaines bactéries utilisent même de façon spécifique des composés du soufre (sulfates, soufre élémentaire, sulfures, soufre organique) en faisant varier son état d'oxydation selon les conditions oxydo-réductrices du milieu ambiant (CNRC, 1977).

Les activités humaines ont, par l'industrialisation croissante, modifié le cycle du soufre en accélérant la circulation du soufre dans l'écosystème et



en augmentant les quantités de cet élément dans les réservoirs "atmosphère" et "eaux de surface". L'utilisation de combustibles fossiles (charbon, surtout) contenant du soufre et le raffinage de certains métaux (nickel, cuivre, etc.) extraits à partir de sulfures, ont libéré des quantités importantes d'oxyde de soufre dans l'atmosphère causant, par la suite, le phénomène qu'on a appelé "les précipitations acides".

Les rejets de certaines industries (pâtes et papiers, traitement de minerais, industrie chimique, etc.), certains rejets de matière organique (fumier, purin, effluents d'égouts), l'épandage de sels de déglacage en hiver et de certains engrais à base de soufre, peuvent être des sources de soufre, et donc de sulfates dans le milieu aquatique. En effet, dans les conditions d'oxygénation rencontrées habituellement, la forme la plus oxydée du soufre, à savoir les sulfates, SO_4^{2-} , est la plus stable. C'est seulement lorsque prévalent des conditions particulièrement anaérobiques, qu'existent, dans l'eau, des espèces réduites comme les sulfures métalliques ou organiques ou le gaz H_2S qui peut être libéré vers l'atmosphère.

Le mouvement des ions sulfates dans le milieu terrestre est conditionné en grande partie par le degré d'adsorption de ces ions dans les sols (Fuller et al., 1985; Johnson et Todd, 1983; Singh et al., 1980; Johnson et Cole, 1977). En effet, plusieurs sols ont de grandes capacités d'adsorption des sulfates (Johnson et Cole, 1977; Fitzgerald et al., 1982) et particulièrement ceux qui contiennent les teneurs les plus élevées en oxydes de fer et d'aluminium, ce qui est le cas, entre autres, des sols podzoliques et des "terres brunes" (Singh, 1984b; Johnson et Todd, 1983). D'autres facteurs

comme un pH faible ou une température élevée favoriseraient l'adsorption des sulfates dans les sols (Singh, 1984c; 1984d). Il semblerait, de plus, que ce phénomène soit en bonne partie réversible et que l'on aurait ainsi affaire à un équilibre d'adsorption-désorption avec l'eau contenue dans les sols (Fuller et al., 1985; Wiklander, 1980; Johnson et Henderson, 1979; Khanna et Beese, 1978).

Certains sols pourront donc agir comme d'immenses réservoirs de sulfates en équilibre avec l'eau qui est en contact avec eux étant donné que cet équilibre semble s'établir en dedans d'une période de temps relativement courte de l'ordre de quelques heures (Singh, 1984d). Cet équilibre serait le mieux décrit par l'équation d'adsorption de Freundlich (Singh, 1984a) (1):

$$X_{\text{ads}} = a \cdot (C)^b \quad (1)$$

où:

X_{ads} : quantité de sulfates adsorbée dans le sol (mg/kg de sol);

C : concentration à l'équilibre de soufre total dans l'eau du sol (mg/l);

a : coefficient de l'équation de Freundlich;

b : coefficient de l'équation de Freundlich.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DES SULFATES DANS LES EAUX DOUCES: TRAVAUX ANTÉCÉDENTS

La modélisation des sulfates dans les eaux douces n'a été le sujet que de peu de travaux. En effet, les niveaux de concentration des sulfates dans les eaux destinées à des usages domestiques ou industriels n'ont jusqu'à maintenant créé que peu de problèmes comparativement aux niveaux d'autres paramètres considérés comme plus critiques tels la DBO₅, le phosphore total ou l'oxygène dissous. Le problème des précipitations acides a amené plus d'intérêt sur la question des sulfates en eau douce. C'est ainsi qu'un modèle comme celui de "Birkenes" (Christophersen et al., 1984) a été mis au point. C'est un des rares modèles où les concentrations en sulfates dans les eaux de surface constituent une sortie du modèle et non une donnée d'entrée.

Le modèle de Birkenes, dans sa forme la plus récente (Seip et al., 1985; Rustad et al., 1986), permet de simuler les concentrations dans les ruisseaux de plusieurs espèces ioniques, dont les sulfates. À un modèle hydrologique de base relativement simple, se greffe, en effet, un sous-modèle de qualité chimique de l'eau. Il s'agit d'un modèle à trois compartiments: un compartiment "horizons inférieurs du sol" (B) contenant les eaux souterraines, un compartiment "horizons supérieurs du sol" (A) contenant les eaux de la zone vadose du sol, de même que les sulfates qui sont adsorbés dans cette partie du sol, et un troisième compartiment saisonnier "couvert de neige" (S). Un bilan hydrologique et ionique global peut donc être calculé pour l'ensemble du système étant donné que les

niveaux d'eau et le contenu en ions de chacun de ces réservoirs et les quantités transférées de l'un à l'autre et au ruisseau sont connues.

Dans le modèle de Birkenes, la concentration en sulfates des eaux de fonte est considérée comme étant égale à trois fois la concentration moyenne de la neige. La concentration des eaux provenant du réservoir supérieur du sol (A) est obtenue par l'équation:

$$C_a = (F'_a - AC_a) K_a \quad (2)$$

où:

C_a : concentration des sulfates dans la phase liquide du réservoir "A" ($\mu\text{eq/l}$);

F'_a : quantité de sulfates solubles en solution et dans la phase solide, dans le réservoir "A" ($\mu\text{eq/m}^2$);

A : lame d'eau contenue dans le réservoir "A" (mm);

K_a : constante pour le réservoir "A" ($1\ 200\ \text{m}^2/\text{l}$).

La minéralisation en sulfates dans le réservoir A est prise en considération par l'équation:

$$S_{\text{miner}} = \frac{D_{\text{miner}} (A'_{\text{min}} - A)}{A'_{\text{min}}} \quad \text{pour } A \leq A'_{\text{min}} \quad (3)$$

avec $A'_{\text{min}} = A_{\text{min}} - 3$

où:

S_{miner} : quantité de sulfates provenant de la minéralisation dans le réservoir "A" ($\mu\text{eq}/\text{m}^2/\text{j}$);

D_{miner} : constante de minéralisation ($1\ 050\ \mu\text{eq}/\text{m}^2/\text{j}$);

A : lame d'eau contenue dans le réservoir A (mm);

A_{min} : lame d'eau minimale contenue dans le réservoir A (mm).

L'effluent du réservoir B, correspondant aux eaux de la nappe phréatique, possède une concentration déterminée par:

$$C_b = \frac{S_b}{B} \quad (5)$$

et:

$$\frac{d S_b}{dt} = (Q_a - Q_{ac}) C_a - (Q_b + Q_p) C_b - E_b C_b + K_b B (C_{eq} - C_b) - S_{red} S_b \quad (6)$$

où:

C_b : concentration des sulfates à la décharge du réservoir B ($\mu\text{eq}/\text{l}$);

S_b : quantité de sulfates en solution dans le réservoir B ($\mu\text{eq}/\text{m}^2$);

B : lame d'eau contenue dans le réservoir B (mm);

t : pas de temps de la simulation (j);

Q_a : décharge totale du réservoir A (mm/j);

Q_{ac} : décharge du réservoir A vers le ruisseau (mm/j);

C_a : concentration des sulfates de la décharge du réservoir A ($\mu\text{eq/l}$);

Q_b : décharge totale du réservoir B (mm/j);

Q_p : décharge de l'écoulement piston du réservoir A au réservoir B (mm/j);

E_b : évapotranspiration dans le réservoir B (mm/j);

K_b : constante de taux ($0,02 \text{ j}^{-1}$);

C_{eq} : concentration à l'équilibre dans le réservoir B ($\mu\text{eq/l}$);

S_{red} : facteur de réduction (j^{-1}).

La réduction et l'adsorption irréversible des sulfates dans le réservoir B sont estimées, selon la température, à:

$$S_{red} = 0 \quad \text{pour } T_{av} \leq 10^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$S_{red} = \frac{D_{red} (T_{av} - 10)}{10} \quad \text{pour } 10^\circ\text{C} < T_{av} \leq 20^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$S_{red} = D_{red} \quad \text{pour } T_{av} > 20^\circ\text{C} \quad (9)$$

où:

S_{red} : facteur de réduction (j^{-1});

D_{red} : proportion journalière maximale de sulfates réduits dans les eaux souterraines ($0,03 \text{ j}^{-1}$);

T_{av} : température moyenne des 20 jours précédents le jour considéré ($^\circ\text{C}$).

CHAPITRE 3

INTÉGRATION DE LA SOUS-ROUTINE DE MODÉLISATION DES SULFATES AU MODÈLE HYDROLOGIQUE CEQUEAU

3.1 Structure de support

Le modèle CEQUEAU de base est un programme permettant de simuler certains paramètres hydrologiques dont les débits en rivière (Morin et al., 1981). La surface du bassin versant à modéliser est subdivisée en carreaux de 10 km de côté (carreaux entiers) qui sont eux-mêmes subdivisés en carreaux de surfaces non-définies dépendant des sous-bassins (carreaux partiels). Au pas de temps journalier, des charges hydrauliques sont produites sur chaque carreau partiel et une certaine partie de la charge de ces carreaux est transférée au(x) carreau(x) partiel(s) immédiatement en aval.

Des sous-programmes déterminant la qualité de l'eau sont greffés au programme principal (Morin et al., 1987; 1986; 1985; 1984a; 1984b; 1983a; 1983b). De la même façon que pour les charges hydrauliques, des charges (de sulfates dans notre cas) sont produites sur chaque carreau partiel et transférées sur le(s) carreau(x) partiel(s) immédiatement en aval de chacun. À chaque jour, la charge hydraulique, puis les paramètres de qualité sont simulés avant de passer à la journée suivante de simulation.

Les débits en rivière sont reconstitués à partir de trois types d'écoulement sur le bassin: le ruissellement de surface, le ruissellement hypodermique (retardé) et l'écoulement originant de la nappe phréatique. Le volume de

débordement des lacs et des marais est aussi considéré de façon distincte. À l'exutoire d'un carreau partiel, à la fin d'une journée, on considère que le mélange des différents écoulements est complet, sur le tronçon de rivière.

Des sources ponctuelles et diffuses sont considérées dans les apports de sulfates à la rivière. Les apports des sources ponctuelles (rejets industriels, rejets municipaux, déversements de purin) sont ajoutés directement au tronçon de rivière sur le carreau partiel. Les apports diffus (précipitations, dépôts secs, eaux souterraines, épandage de fumiers, fertilisants chimiques) sont considérés comme uniformes sur un carreau entier et sont répartis sur chaque carreau partiel au prorata de leur surface relative au carreau entier.

De plus, la possibilité de transformation de la charge par des phénomènes chimiques ou biologiques ayant lieu en rivière et sur le bassin avant transport vers la rivière est considérée. Enfin, comme les sulfates constituent la forme la plus stable du soufre en milieu aquatique, l'hypothèse que le soufre produit ou déversé sur le bassin ou dans la rivière se retrouvera sous forme de sulfates, sera retenue pour les fins de la simulation.

3.2 Sous-routine de simulation des concentrations des sulfates en rivière

3.2.1 Calcul de la concentration en sulfates des eaux à l'exutoire des carreaux partiels (COS_{ex})

Le but de la modélisation est de déterminer la concentration des sulfates à l'exutoire de chaque carreau partiel (COS_{ex}) par un bilan des charges en sulfates produites et transférées sur chacun de ces carreaux.

$$COS_{ex} = \frac{CHS_{init} + CHS_{am} + CHS_{pon} + (CHS_{loc} \cdot R_{cp})}{V_{dil}} \cdot e^{-K_D \Delta t} \quad (10)$$

où:

COS_{ex} : concentration en sulfates à l'exutoire d'un carreau partiel (mg/l);

CHS_{init} : charge initiale en sulfates dans le tronçon de rivière au début du jour (kg);

CHS_{am} : charge en sulfates journalière provenant des carreaux partiels immédiatement en amont (kg);

CHS_{pon} : charge en sulfates d'origine ponctuelle sur un carreau partiel (kg);

CHS_{loc} : charge en sulfates journalière locale apportée par les différentes formes d'écoulement sur un carreau entier (kg);

R_{cp} : rapport de la surface du carreau partiel sur la surface du carreau entier;

V_{dil} : volume total de dilution sur chaque carreau partiel (milliers de m^3);

K_D : coefficient de dégradation en rivière (j^{-1}).

Δt : intervalle de temps de la simulation (j);

Cette concentration (COS_{ex}) est égale à la charge présente sur le tronçon de rivière sur le carreau partiel ($CHS_{init} + CHS_{am} + CHS_{pon} + (CHS_{loc} \cdot R_{cp})$) divisée par le volume d'eau total dans ce tronçon (V_{dil}) multipliée par une fonction de dégradation en rivière ($e^{-K_D \Delta t}$) pour tenir compte si nécessaire de certains phénomènes possibles comme la sédimentation, l'assimilation par les organismes vivants, la réduction, etc. Une partie de cette charge est produite sur le carreau partiel ($CHS_{pon} + (CHS_{loc} \cdot R_{cp})$); l'autre est présente initialement sur le carreau partiel (CHS_{init}) ou provient des carreaux partiels en amont (CHS_{am}). La charge produite sur le carreau partiel peut être soit d'origine ponctuelle (CHS_{pon}), soit d'origine diffuse ($CHS_{loc} \cdot R_{cp}$). Cette dernière quantité est calculée pour l'ensemble du carreau entier (CHS_{loc}) et répartie au prorata de la surface des carreaux partiels par rapport aux carreaux entiers (R_{cp}). A la fin de chaque jour, l'hypothèse que le mélange est complet sur le tronçon et que la concentration des eaux y est uniforme, est retenue.

3.2.2 Fonction de production ($CHS_{loc} \cdot R_{cp}$) et CHS_{pon})

3.2.2.1 Calcul de la charge diffuse produite sur le bassin pour chaque carreau entier (CHS_{loc})

La charge diffuse produite sur le bassin (CHS_{loc}) est égale à la somme des charges apportées par le ruissellement ($V_R \cdot COS_{eq}$), par l'écoulement hypodermique ($V_H \cdot COS_H$), par l'écoulement souterrain ($V_S \cdot COS_S$) et par l'eau de débordement des lacs et marais ($V_L \cdot COS_{PPT}$).

$$CHS_{loc} = (V_R \cdot COS_{eq}) + (V_H \cdot COS_H) + (V_S \cdot COS_S) + (V_L \cdot COS_{PPT}) \quad (11)$$

où:

CHS_{loc} : charge locale journalière en sulfates apportée par les différentes formes d'écoulement sur un carreau entier (kg);

V_R : volume journalier de ruissellement sur un carreau entier (milliers de m^3);

COS_{eq} : concentration en sulfates à l'équilibre de l'eau du sol en surface (mg/l);

V_H : volume journalier d'écoulement hypodermique sur un carreau entier (milliers de m^3);

COS_H : concentration en sulfates de l'écoulement hypodermique (mg/l);

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

COS_S : concentration moyenne en sulfates de l'écoulement souterrain (mg/l);

V_L : volume journalier des eaux de débordement des lacs et marais sur un carreau entier (milliers de m^3);

COS_{PPT} : concentration en sulfates des précipitations journalières (mg/l).

Les eaux de débordement des lacs et marais sont considérées comme ayant des concentrations en sulfates égales à celles des précipitations sur le carreau entier (COS_{PPT}). La concentration de l'écoulement souterrain est fixée à une valeur intermédiaire entre la concentration des eaux souterraines profondes (COS_P) et la concentration à l'équilibre de l'eau du sol en surface (COS_{eq}). Ainsi nous avons:

$$COS_S = P_{nap} \cdot COS_P + (1 - P_{nap}) \cdot COS_{eq} \quad (12a)$$

où:

COS_S : concentration moyenne en sulfates de l'écoulement souterrain arrivant en rivière (mg/l);

COS_P : concentration en sulfates des eaux souterraines profondes mesurée ou estimée sur le carreau entier (mg/l);

COS_{eq} : concentration à l'équilibre en sulfates de l'eau du sol en surface (mg/l);

P_{nap} : paramètre d'ajustement de la contribution des eaux souterraines profondes (entre 0.0 et 1.0).

Pour sa part, la concentration de l'écoulement hypodermique (COS_H) est la moyenne entre la concentration de l'écoulement souterrain (COS_S) et la concentration à l'équilibre de l'eau du sol en surface (COS_{eq}):

$$\text{COS}_H = (\text{COS}_S + \text{COS}_{\text{eq}})/2 \quad (12b)$$

Enfin, la concentration de l'écoulement de surface (COS_{eq}) résulte d'un équilibre avec la quantité de sulfates contenu dans les horizons supérieurs du sol (CHS_{sol}), selon l'équation d'adsorption de Freundlich (Singh, 1984a) (voir équation (1)) qui se traduit après transformation, par:

$$\text{COS}_{\text{eq}} = 3.0 \cdot [\text{CHS}_{\text{sol}} / (a \cdot M_{\text{sol}} \cdot S_{\text{sol}})]^{1/b} \quad (12c)$$

où:

COS_{eq} : concentration en sulfates à l'équilibre de l'eau du sol (mg/l);

CHS_{sol} : charge en sulfates accumulée dans et sur le sol, disponible pour être entraînée par les eaux (kg);

a : coefficient de l'équation de Freundlich;

b : coefficient de l'équation de Freundlich;

M_{sol} : masse moyenne de sol agissant comme réservoir de sulfates, par unité de surface (kg/m^2);

S_{sol} : surface de sol sur un carreau entier (km^2).

La charge en sulfates accumulée dans le sol est égale à la charge non entraînée lors de la journée précédente (CHS_{sol}), à laquelle s'ajoute une charge dite "atmosphérique" provenant de la pluie, de la neige et des dépôts secs, (CHS_{atm}) et une autre apportée par l'épandage des fumiers et purins ($D_{\text{ani}} \cdot \text{PS}_{\text{ani}}$). Une partie de cette charge peut-être rendue non-disponible par adsorption irréversible dans le sol, assimilation biologique ou réduction; cette partie peut être approximée par une fonction de dégradation

similaire à celle d'une cinétique du premier ordre (Stumm et Morgan, 1981) ($e^{-K_S \Delta t}$) où le coefficient de dégradation (K_S) est corrigé en fonction de la température (Morin et al., 1985):

$$CHS_{sol} = [CHS_{sol_0} + CHS_{atm} + (D_{ani} \cdot PS_{ani}) + (D_{eng} \cdot PS_{eng})] \cdot e^{-K_S \Delta t} \quad (13)$$

avec

$$K_S = K_{S_{20}} \cdot \theta^{T-20} \quad (14)$$

où:

CHS_{sol} : charge en sulfates accumulée dans et sur le sol, disponible pour être entraînée par les eaux (kg);

CHS_{sol_0} : charge en sulfates accumulée dans et sur le sol à la fin du jour précédent, après lessivage (kg);

CHS_{atm} : charge journalière en sulfates d'origine atmosphérique (précipitations et dépôts secs) transférée au sol (kg);

D_{ani} : coefficient mensuel d'épandage des fumiers;

PS_{ani} : production moyenne journalière potentielle de sulfates par les porcs, les bovins, les chevaux et les poulets sur un carreau entier (kg);

D_{eng} : coefficient mensuel d'épandage des engrais;

PS_{eng} : production moyenne journalière des sulfates par les engrais épandus sur un carreau entier (kg);

K_S : coefficient de déperdition des sulfates accumulés dans le sol à la température T (j^{-1});

$K_{S_{20}}$: coefficient de déperdition des sulfates accumulés dans le sol à 20°C (j^{-1});

T : température du sol en surface, supposée approximativement égale à la température de l'air (°C);

Δt : intervalle de temps de la simulation (j);

θ : constante empirique pour la correction du coefficient de déperdition des sulfates au sol selon la température (légèrement supérieure à 1,0).

Le transfert des apports atmosphériques en sulfates au sol est retardé par la présence du couvert de neige pendant une partie de l'année. Il y a donc trois situations à considérer dans le cas de l'évaluation des apports atmosphériques:

- a) absence d'accumulation de neige
- b) accumulation de neige au sol sans fonte
- c) accumulation de neige au sol avec fonte

a) absence d'accumulation de neige

Cette situation se ramène simplement à:

$$CHS_{atm} = CHS_{DS} + CHS_{PPT} \quad (15)$$

où:

CHS_{atm} : charge journalière en sulfates d'origine atmosphérique transférée au sol (kg);

CHS_{DS} : charge journalière en sulfates des dépôts secs (kg);

CHS_{PPT} : charge journalière en sulfates des précipitations (kg);

b) accumulation de neige sans fonte

La charge en sulfates des précipitations et des dépôts secs s'accumule dans le couvert de neige. La charge en sulfates transférée au sol est nulle, donc:

$$CHS_{atm} = 0 \quad (16)$$

et:

$$CHS_{N j} = CHS_{N j-1} + CHS_{DS} + CHS_{PPT} \quad (17)$$

où:

CHS_{atm} : charge journalière en sulfates d'origine atmosphérique transférée au sol (kg);

$CHS_{N j}$: charge en sulfates du couvert de neige à la fin du jour de simulation (j) (kg);

$CHS_{N j-1}$: charge en sulfates du couvert de neige à la fin du jour précédent (j-1) (kg);

CHS_{DS} : charge en sulfates journalière des dépôts secs (kg);

CHS_{PPT} : charge en sulfates journalière des précipitations (kg);

c) accumulation de neige avec fonte

La charge en sulfates d'origine atmosphérique et transférée au sol (CHS_{atm}) est égale à la charge en sulfates des eaux provenant de la fonte du couvert de neige (CHS_F) ajoutée, éventuellement, à la charge apportée par la pluie non-retenue par le couvert de neige ($H_{PPTeff} \cdot S_N \cdot COS_{PPT}$):

$$CHS_{atm} = CHS_F + (H_{PPTeff} \cdot S_N \cdot COS_{PPT}) \quad (18)$$

où:

CHS_{atm} : charge journalière en sulfates d'origine atmosphérique transférée au sol (kg);

CHS_F : charge en sulfates des eaux de fonte (kg);

H_{PPTeff} : équivalence en eau de la précipitation efficace (non-retenue dans le couvert de neige) (mm);

S_N : surface recouverte par le couvert de neige sur le carreau entier (km^2);

COS_{PPT} : concentration en sulfates des précipitations (mg/l).

La concentration en sulfates des eaux de fonte libérée par le couvert de neige (COS_F) est calculée à partir de certaines caractéristiques

physico-chimiques de la neige et de l'équation (19) (Jones et al., 1985; Jones et al., 1986):

$$\text{COS}_F = \text{CX}_F \cdot \frac{\text{COS}_N^{\circ}}{(\text{H}_{N \text{ j-1}} - \text{H}_{N \text{ j}})} \cdot [\text{H}_{N \text{ j-1}} \cdot \exp(-K_F (\text{H}_N^{\circ} - \text{H}_{N \text{ j-1}})) - \text{H}_{N \text{ j}} \cdot \exp(-K_F (\text{H}_N^{\circ} - \text{H}_{N \text{ j}}))] \quad (19)$$

et

$$\text{CHS}_F = \text{H}_F \cdot \text{S}_N \cdot \text{COS}_F \quad (20)$$

où:

COS_F : concentration en sulfates des eaux de fonte (mg/l);

CX_F : coefficient d'ajustement de la concentration en sulfates des eaux de fonte (environ 1.0);

COS_N° : concentration en sulfates du couvert de neige au tout début d'un épisode continu de fonte (mg/l);

$\text{H}_{N \text{ j-1}}$: équivalence en eau du couvert de neige le jour précédent (mm);

$\text{H}_{N \text{ j}}$: équivalence en eau du couvert de neige le jour de la simulation (mm);

K_F : coefficient empirique de fonte caractéristique pour l'ion sulfate (mm^{-1});

H_N° : équivalence en eau du couvert de neige au tout début d'un épisode continu de fonte (mm);

- CHS_F : charge en sulfates des eaux de fonte (kg);
 H_F : lame d'eau libérée par la fonte (mm);
 S_N : surface recouverte par le couvert de neige sur le carreau entier
(km^2).

Le paramètre K_F est un coefficient empirique estimé, pour les sulfates, à partir de l'équation (21):

$$K_F = (7,60 \times 10^{-2} \cdot COS_N^0) - (1,43 \times 10^{-2}) \quad (21)$$

où:

- K_F : coefficient empirique de fonte caractéristique pour l'ion sulfate
(mm^{-1});
 COS_N^0 : concentration en sulfates du couvert de neige au tout début d'un
épisode continu de fonte (mg/l).

La concentration du stock de neige au tout début d'un épisode de fonte (COS_N^0) doit être recalculée aussitôt qu'il y a un jour de regel (sans fonte) ou un jour avec précipitation d'après l'équation:

$$COS_N^0 = \frac{CHS_N^0}{H_N^0 \cdot S_N} \quad (22)$$

et:

$$H_N^{\circ} = H_{N \ j-1} + H_{PPTret} \quad (23)$$

où:

COS_N° : concentration en sulfates du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte (mg/l);

CHS_N° : charge en sulfates du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte (kg);

S_N : surface recouverte de neige sur le carreau entier (km²);

H_N° : équivalence en eau du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte (mm);

$H_{N \ j-1}$: équivalence en eau du couvert de neige le jour précédent (mm);

H_{PPTret} : équivalence en eau de la précipitation retenue par le couvert de neige (mm).

Le bilan massique en sulfates du couvert de neige est calculé jusqu'à sa disparition:

$$CHS_{N \ j} = CHS_{N \ j-1} - CHS_F + (H_{PPTret} \cdot S_N \cdot COS_{PPT}) + CHS_{DS} \quad (24)$$

où:

$CHS_{N \ j}$: charge en sulfates du couvert de neige à la fin du jour de simulation (kg);

- $CHS_N j-1$: charge en sulfates du couvert de neige le jour précédent (kg);
- CHS_F : charge en sulfates des eaux de fonte (kg);
- H_{PPTret} : équivalence en eau de la précipitation retenue dans le couvert de neige (mm);
- S_N : surface recouverte de neige sur le carreau entier (km²);
- COS_{PPT} : concentration en sulfates des précipitations journalières (mg/l);
- CHS_{DS} : charge en sulfates journalière des dépôts secs (kg).

La charge en sulfates accumulée dans le sol à la fin d'une journée, après lessivage, (CHS'_{sol}) servira de charge initiale dans le sol lors du jour de simulation suivant (CHS_{sol_0} , équation 13).

$$CHS'_{sol} = CHS_{sol} - CHS_{ent} \quad (25)$$

où:

- CHS'_{sol} : charge en sulfates accumulée dans et sur le sol à la fin du jour, après lessivage (kg);
- CHS_{sol} : charge en sulfates accumulée dans et sur le sol, disponible pour être entraînée par les eaux (kg);
- CHS_{ent} : charge en sulfates du sol entraînée par ruissellement sur un carreau entier (kg) ($V_R \cdot COS_{eq}$, équation 11).

3.2.2.2 Calcul de la charge ponctuelle en sulfates produite sur chaque carreau partiel (CHS_{pon}).

Les charges ponctuelles de sulfates, au niveau des carreaux partiels (CHS_{pon}) proviennent des effluents urbains (CHS_{mun}) et des effluents industriels (CHS_{ind}).

$$CHS_{pon} = CHS_{mun} + CHS_{ind} \quad (26)$$

où:

CHS_{pon} : charge en sulfates d'origine ponctuelle sur un carreau partiel (kg);

CHS_{mun} : charge en sulfates moyenne journalière provenant des rejets municipaux sur le carreau partiel (kg);

CHS_{ind} : charge en sulfates moyenne journalière provenant des rejets industriels sur le carreau partiel (kg);

3.2.3 Fonction de transfert (CHS_{init} et CHS_{am})

3.2.3.1 Calcul des charges en sulfates initialement présentes sur les carreaux partiels (CHS_{init})

La charge résiduelle sur chaque carreau partiel (CHS_{init}) est égale au produit de la concentration de ces eaux telle que calculée le jour précédent ($COS_{ex\ j-1}$) par le volume résiduel (V'_{cp}) de l'eau contenue dans le tronçon de rivière situé sur le carreau partiel.

$$CHS_{init} = COS_{ex\ j-1} \cdot V'_{cp} \quad (27)$$

où:

CHS_{init} : charge en sulfates sur le tronçon de rivière au début du jour (kg);

$COS_{ex\ j-1}$: concentration en sulfates à l'exutoire d'un carreau partiel à la fin du jour précédent (mg/l);

V'_{cp} : volume d'eau du tronçon de rivière inclus sur le carreau partiel à la fin du jour précédent (milliers de m^3).

Le volume résiduel d'eau du tronçon (V'_{cp}) est égal à la somme du volume minimal du tronçon ($L \cdot W \cdot P$) et du volume excédentaire variable estimé pour le jour précédent (V'_{var}):

$$V'_{cp} = (L \cdot W \cdot P) + V'_{var} \quad (28)$$

où:

V'_{cp} : volume d'eau du tronçon de rivière inclus sur le carreau partiel à la fin du jour précédent (milliers de m^3);

L : longueur du tronçon de rivière sur le carreau partiel (km);

W : largeur du tronçon de rivière (m);

P : profondeur minimale du tronçon de rivière (m);

V'_{var} : volume d'eau accumulé à la fin du jour précédent (milliers de m^3).

3.2.3.2 Calcul de la charge en sulfates provenant des carreaux partiels en amont (CHS_{am})

Les charges transférées de chaque carreau partiel en amont (CHS_{am}) sont calculées par le produit de la concentration en sulfates des eaux à l'exutoire de ces carreaux ($COS_{ex\ i}$) par le volume d'eau transféré de ces carreaux au carreau partiel qui les reçoit (V_i):

$$CHS_{am} = \sum_{i=1}^n (COS_{ex\ i} \cdot V_i) \quad (29)$$

CHS_{am} : charge en sulfates journalière provenant des carreaux partiels immédiatement en amont (kg);

n : nombre de carreaux partiels en amont;

$COS_{ex\ i}$: concentration en sulfates journalière à l'exutoire du carreau partiel "i" (mg/l);

V_i : volume d'eau provenant du carreau partiel "i" en amont (milliers de m^3).

Les volumes d'eau transférée d'un carreau partiel à l'autre (V_i) sont ceux calculés par le modèle hydrologique. Le calcul des transferts de charges s'effectue de l'amont vers l'aval du bassin versant. Sur chaque carreau partiel, la concentration journalière en sulfates est finalement obtenue en divisant la charge totale en sulfates présente sur le tronçon par le volume de dilution correspondant, tout en considérant au besoin la dégradation en rivière (équation 10). Le volume de dilution (V_{dil}) est fourni par le modèle hydrologique:

$$V_{dil} = V'_{cp} + V_{am} + V_{loc} \quad (30)$$

où:

V_{dil} : volume total d'eau de dilution sur chaque carreau partiel (milliers de m^3);

V'_{cp} : volume d'eau du tronçon de rivière à la fin du jour précédent, tel que défini à l'équation 28 (milliers de m^3);

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

V_{loc} : volume total des différents écoulements sur un carreau partiel pendant le jour considéré (milliers de m^3).

CHAPITRE 4

AJUSTEMENT DU MODELE

4.1 Méthode d'estimation des données d'entrée

4.1.1 Estimation de la concentration en sulfates des précipitations (COS_{PPT})

Il est possible d'estimer la concentration en sulfates des précipitations (COS_{PPT}) à partir des données disponibles.

Le réseau d'échantillonnage des précipitations du Québec (REPQ), opéré par le ministère de l'Environnement du Québec depuis juin 1981, regroupe 46 stations situées pour la plupart dans le sud du Québec. Les précipitations (pluie, neige, bruine, verglas, etc.) sont recueillies et échantillonnées sur une base hebdomadaire et leur concentration en sulfates, entre autres, y est mesurée.

4.1.2 Estimation de la charge en sulfates apportée par les dépôts secs (CHS_{DS})

Les concentrations en SO_2 et sulfates particulaires dans l'air sont mesurées, au Canada, sur une base journalière, depuis 1980, dans les stations d'échantillonnage du réseau APN (Air and Precipitation Network): Kejimikujik, Forêt Montmorency-Lac Laflamme, ELA-Kenora, Algoma et quelques autres.

De toutes ces stations du réseau, une seule (Forêt Montmorency - Lac Laflamme) se trouve au Québec. Les quantités de dépôts secs sont évaluées ainsi d'après l'équation (31):

$$CHS_{DS} = (v_{SO_4} \cdot [SO_4]_{air}) + (v_{SO_2} \cdot [SO_2]_{air} \cdot \frac{PM_{SO_4}}{PM_{SO_2}}) \quad (31)$$

où:

CHS_{DS} : charge en sulfates journalière des dépôts secs (kg/km²)

v_{SO_4} : vitesse de déposition de SO₄ particulaire (mm/j)

$[SO_4]_{air}$: concentration de SO₄ particulaire dans l'air (g/m³)

v_{SO_2} : vitesse de déposition du gaz SO₂ (mm/j)

$[SO_2]_{air}$: concentration de SO₂ dans l'air (g/m³)

PM_{SO_4} : poids moléculaire de SO₄ (96 g mol⁻¹)

PM_{SO_2} : poids moléculaire de SO₂ (64 g mol⁻¹)

De tous les paramètres à évaluer dans le cas de la problématique des précipitations acides, la quantité de dépôts secs (Sheih et al., 1979) ou plus particulièrement la vitesse de déposition est la mesure la plus difficile à effectuer étant donné la variabilité très forte de cette quantité en fonction de facteurs comme le type de surface de captage des dépôts (couvert végétal, présence de neige, etc.), le taux d'humidité du milieu, la vitesse et la direction des vents locaux, les températures de l'air et des surfaces de captage, etc.

Les quantités de dépôts secs pourront être estimées à partir de l'équation (31), des vitesses de déposition mensuelles moyennes évaluées à différents sites au Canada par Barrie et al., (1984) (tableau 1) et des concentrations moyennes mensuelles en SO₂ et SO₄ particulières mesurées à la station d'échantillonnage la plus proche, c'est-à-dire à la Forêt Montmorency dans le cas du Québec.

4.1.3 Estimation des apports de charge en sulfates d'origine industrielle (CHS_{ind})

L'estimation de la charge que peut apporter un effluent industriel (CHS_{ind}) dépend de la concentration de cet effluent et du volume d'eau que peut rejeter cette industrie. Le volume d'eau que peut rejeter cette dernière dépend de la nature de ses opérations et du volume de production industrielle, que l'on peut relier au nombre d'employés. Le paramètre CHS_{ind} sera donc évalué selon l'équation (32):

$$CHS_{ind} = \sum_{i=1}^{ind} (NE_i \cdot CE_i \cdot COS_{ind\ i}) \quad (32)$$

où:

CHS_{ind} : charge en sulfates moyenne journalière provenant des rejets industriels sur le carreau partiel (kg);

NE_i : nombre d'employés dans l'industrie "i" (personnes);

CE_i : consommation journalière d'eau par employé pour le type d'industrie "i" (millions de litres/personne);

Tableau 1: Vitesses moyennes mensuelles de déposition de SO_2 (v_{SO_2}) et SO_4 particulaire (v_{SO_4}) obtenues à partir des données des 2 stations APN de ELA, Long⁴ Point, Chalk River et Kejimikujik (Barrie et al., 1984)

Mois	v_{SO_2} (10^5 mm/j)	v_{SO_4} (10^5 mm/j)
Janvier	1,5	0,78
Février	1,5	0,78
Mars	4,1	2,1
Avril	3,8	2,0
Mai	3,6	2,0
Juin	3,1	1,6
Juillet	2,8	1,7
Août	2,9	1,6
Septembre	3,1	1,3
Octobre	3,3	1,3
Novembre	3,5	1,3
Décembre	1,4	0,78

$COS_{ind\ i}$: concentration moyenne potentielle en sulfates de l'effluent industriel "i" (mg/l);

ind : nombre d'industries sur le carreau partiel.

Certains effluents industriels contiennent du soufre sous des formes autres que des sulfates. Les sulfures, le soufre organique et autres formes réduites pourront éventuellement s'oxyder en sulfates à plus ou moins long terme dans les eaux étant donné que la forme "sulfate" est la plus stable. C'est pour cette raison que le modèle évalue les concentrations potentielles de sulfates.

Des valeurs estimées de consommations d'eau par employé (CE_i) et de concentrations moyennes potentielles d'effluents ($COS_{ind\ i}$) pour quelques industries sont suggérées au tableau 2.

4.1.4 Estimation de la charge en sulfates originant des égouts municipaux (CHS_{mun})

La charge en sulfates provenant des égouts municipaux provient notamment des excréments humains et aussi, en hiver, des sels de déglacage. La charge est donc estimée proportionnellement à la population rattachée aux égouts municipaux et la charge unitaire (pour une seule personne) est augmentée d'un facteur PUS_{sel} pour tenir compte de l'apport supplémentaire des sels de déglacage.

$$CHS_{mun} = N_{hum} \cdot (PUS_{hum} + PUS_{sel}) \quad (33)$$

CHS_{mun} : charge en sulfates moyenne journalière provenant des rejets municipaux sur le carreau partiel (kg);

Tableau 2: Estimés des concentrations potentielles en sulfates des effluents non-traités et des consommations d'eau par employé pour différents types d'industries.

Industrie	Consommation d'eau par employé (1) (l/personne/j)	[SO ₄ ²⁻] (mg/l) (2)	
		intervalle	estimé
électroplaquage	2 250	30 - 120	75
aciérie	2 250	20 - 2 000	400
effluent acide de mines	12 500	500 - 2 000	1 200
industrie photochimique	12 500	---	3 800
tannerie	4 100	190 - 700	450
raffinage de pétrole	14 300	60 - 240	150
pâtes à papiers:			
· pâte aux sulfates	61 400	30 000 - 36 000	333 000
· procédé Kraft	61 400	100 - 300	200
produits laitiers	3 600	---	32
abattoirs	4 100	---	27

(1) INRS-Eau - Groupe Système Urbain (1973)

(2) Jorgensen (1979)

N_{hum} : nombre de personnes reliées à un réseau d'égout municipal sur le carreau partiel (personnes);

PUS_{hum} : production moyenne journalière potentielle de sulfates par personne (0,0073 kg/personne);

PUS_{sel} : Apport moyen journalier de sulfates par les sels de déglacage par personne (kg/personne);

$PUS_{sel} = 0,015$ kg/personne (période hivernale);
 $= 0$ kg/personne (période non hivernale).

4.1.5 Estimation des charges en sulfates provenant des fumiers et purins (PS_{ani})

Les charges en sulfates d'origine animale proviennent de la dégradation des fumiers et purins épandus. Compte tenu de la faible production de sulfates par les porcs, en comparaison de celle des autres animaux, il n'est pas jugé utile de tenir compte des déversements ponctuels de purin de porc. Pour la présente évaluation, le modèle tiendra compte seulement des charges diffuses produites par les porcs, les bovins, les chevaux et les poulets.

Les charges produites estimés d'après les analyses effectuées sur les fumiers et purins (MAPAQ, 1978; MAPAQ, 1982), dépendent du type de population animale et de leur nombre d'individus, ce qui se traduit par l'équation suivante:

$$PS_{ani} = (PUS_{por} \cdot N_{por}) + (PUS_{bov} \cdot N_{bov}) + (PUS_{che} \cdot N_{che}) + (PUS_{pou} \cdot N_{pou}) \quad (34)$$

où:

PS_{ani} : production moyenne journalière potentielle de sulfates par les porcs, les bovins, les chevaux et les poulets sur un carreau entier (kg);

PUS_{por} : production moyenne journalière potentielle de sulfates d'un porc (0,016 kg/animal);

PUS_{bov} : production moyenne journalière potentielle de sulfates d'un bovin (0,097 kg/animal);

PUS_{che} : production moyenne journalière potentielle de sulfates d'un cheval (0,083 kg/animal);

PUS_{pou} : production moyenne journalière potentielle de sulfates d'un poulet (0,001 kg/animal);

N_{por} : nombre de porcs sur le carreau entier (animaux);

N_{bov} : nombre de bovins sur le carreau entier (animaux);

N_{che} : nombre de chevaux sur le carreau entier (animaux);

N_{pou} : nombre de poulets sur le carreau entier (animaux).

4.1.6 Estimation des charges en sulfates provenant des engrais chimiques

(PS_{eng})

Les engrais chimiques et autres amendements à base de sulfates utilisés au Québec sont principalement le $(NH_4)_2SO_4$, le K_2SO_4 , le "Sul-Po-Mag" ($K_4Mg_3(SO_4)_5$) et le $CuSO_4$ (Association des fabricants d'engrais du Québec, 1984). Les sulfates représentent 5% de la masse totale des fertilisants

chimiques utilisés au Québec. Pour l'application du modèle, la quantité de sulfates libérés par l'épandage d'engrais chimiques dans un endroit donné, sera considérée égale à 5% de la masse totale d'engrais épandus en cet endroit.

4.1.7 Estimation de la concentration en sulfates des eaux souterraines (COS_p)

Les concentrations en sulfates des eaux souterraines sont variables dans le temps et, surtout, dans l'espace (Simard et DesRosiers, 1979). Ce sont particulièrement les facteurs géologiques qui déterminent les niveaux de sulfates dans ces eaux. Cette variabilité étant présente à l'échelle des carreaux entiers (10 km x 10 km), le modèle applique, pour chacun de ces carreaux, une concentration en sulfates constante dans le temps, mais correspondant à la grande région géologique occupant la plus grande partie du bassin: dans le cas du sud du Québec, les Basses-Terres du Saint-Laurent, le Bouclier canadien ou les Appalaches (tableau 3).

4.2 Valeurs estimées des données d'entrée du modèle pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

4.2.1 Estimation de COS_{pPT} pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

La concentration moyenne mensuelle en sulfates des précipitations sur le bassin versant de la rivière Sainte-Anne est calculée à partir de la moyenne des données des précipitations des deux stations du REPQ situées le plus près du bassin à savoir celle de la Forêt Montmorency et celle de

Tableau 3: Concentrations moyennes en sulfates des eaux souterraines (COS_P) mesurées pour différentes régions géologiques du Québec (Simard et DesRosiers, 1979)

Région géologique	COS _P (mg/l)
Bouclier canadien	10,3
Basses-Terres du Saint-Laurent	15,2
Appalaches	12,7

Sainte-Catherine de Portneuf (Grimard, 1984). Les concentrations moyennes mensuelles pondérées en sulfates des précipitations à ces deux stations ont été calculées à partir des données de 1981 à 1983 (tableaux 4, 5 et 6).

4.2.2 Estimation de CHS_{DS} pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

La charge moyenne mensuelle en sulfates des dépôts secs (tableau 7) est calculée d'après la méthode de la section 3.2.2 et des concentrations en SO_2 et SO_4 particulaire de l'air mesurées à la station APN de la Forêt Montmorency de 1980 à 1983 (Barrie et al., 1982; Environnement Canada, 1984; 1986).

4.2.3 Estimation de CHS_{ind} pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

Les apports de charge en sulfates d'origine industrielle (CHS_{ind}) pour les divers carreaux partiels du bassin de la rivière Sainte-Anne ont été calculés à partir de l'équation (32) et des données du tableau 8.

4.2.4 Estimation de CHS_{mun} pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

La charge en sulfates originant des égouts municipaux (CHS_{mun}) est estimée, suivant l'équation 33, d'après la population humaine reliée aux égouts sur chaque carreau partiel (tableau 9). Sur le bassin de la rivière

Tableau 4: Calcul des concentrations moyennes mensuelles pondérées en sulfates des précipitations à la station du REPQ à la Forêt Montmorency de 1981 à 1983 (Grimard, 1984).

Mois	1981		1982		1983		Moyennes pondérées	
	H _{PPT} (mm)	[SO ₄ ²⁻] (µéq/l)	H _{PPT} (mm)	[SO ₄ ²⁻] (µéq/l)	H _{PPT} (mm)	[SO ₄ ²⁻] (µéq/l)	de [SO ₄ ²⁻] (µéq/l)	(mg/l)
Janvier	--	--	161,4	10,8	180,3	18,3	14,8	0,71
Février	--	--	73,6	15,5	165,5	24,9	22,0	1,06
Mars	--	--	133,2	48,8	105,7	9,2	31,3	1,50
Avril	--	--	154,2	39,9	195,4	22,5	30,2	1,45
Mai	--	--	43,7	79,2	203,2	47,6	40,0	1,92
Juin	--	--	103,9	49,1	98,9	81,4	64,9	3,12
Juillet	--	--	145,0	36,0	182,0	47,9	42,6	2,04
Août	--	--	126,1	36,4	23,9	63,5	40,7	1,95
Septembre	90,6	49,0	123,3	42,0	194,3	49,3	47,0	2,26
Octobre	133,5	28,2	63,9	46,6	112,9	29,6	32,5	1,56
Novembre	59,4	22,4	206,0	49,8	171,2	16,5	37,7	1,81
Décembre	93,0	16,6	161,7	40,7	196,3	6,6	20,9	1,00

Tableau 5: Calcul des concentrations moyennes mensuelles pondérées en sulfates des précipitations à la station du REPQ à Sainte-Catherine de 1981 à 1983 (Grimard, 1984).

Mois	1981		1982		1983		Moyennes pondérées	
	H _{PPT} (mm)	[SO ₄ ²⁻] (µeq/l)	H _{PPT} (mm)	[SO ₄ ²⁻] (µeq/l)	H _{PPT} (mm)	[SO ₄ ²⁻] (µeq/l)	de [SO ₄ ²⁻] (µeq/l)	(mg/l)
Janvier	--	--	101,2	27,4	73,2	27,9	27,6	1,32
Février	--	--	42,7	23,8	107,0	29,3	27,7	1,33
Mars	--	--	96,4	64,4	81,1	15,5	42,1	2,02
Avril	--	--	83,0	92,7	186,2	52,9	65,2	3,13
Mai	--	--	38,8	235,6	223,4	82,3	105,0	5,04
Juin	--	--	112,7	78,7	73,2	68,0	74,5	3,58
Juillet	--	--	145,4	52,2	110,0	87,3	67,3	3,23
Août	109,6	76,7	114,6	80,4	40,8	51,0	74,3	3,57
Septembre	152,4	72,4	135,2	106,9	133,2	59,3	79,3	3,81
Octobre	150,8	91,5	77,0	98,3	105,0	41,9	77,4	3,72
Novembre	72,8	50,6	143,0	108,7	157,0	32,1	65,1	3,12
Décembre	61,6	24,0	100,0	74,0	108,0	27,6	44,0	2,11

Tableau 6: Estimé de la concentration moyenne mensuelle en sulfates des précipitations (COS_{PPT}) sur le bassin versant de la rivière Sainte-Anne à partir des mesures de qualité des précipitations des stations du REPQ à la Forêt Montmorency et à Sainte-Catherine de Portneuf de 1981 à 1983 (Grimard, 1984).

Mois	COS_{PPT} (mg/l)		
	Forêt Montmorency	Sainte-Catherine	Moyenne
Janvier	0,71	1,32	1,02
Février	1,06	1,33	1,20
Mars	1,50	2,02	1,76
Avril	1,45	3,13	2,29
Mai	1,92	5,04	3,48
Juin	3,12	3,58	3,35
Juillet	2,04	3,23	2,64
Août	1,95	3,57	2,76
Septembre	2,26	3,81	3,04
Octobre	1,56	3,72	2,64
Novembre	1,81	3,12	2,47
Décembre	1,00	2,11	1,56

Tableau 7: Évaluation de la charge moyenne mensuelle en sulfates apportée par les dépôts secs à la station APN de la Forêt Montmorency (CHS_{DS})

Mois	CHS_{DS} (kg SO_4/km^2)				
	1980	1981	1982	1983	moyenne
Janvier	--	41	28	13	27
Février	--	72	48	11	44
Mars	--	38	89	23	50
Avril	--	66	48	19	44
Mai	--	41	34	13	29
Juin	--	38	17	21	25
Juillet	--	22	35	22	26
Août	--	38	14	--	26
Septembre	--	27	31	--	29
Octobre	--	8,6	47	--	28
Novembre	--	13	25	--	19
Décembre	69	17	17	--	34

Tableau 8: Estimation des productions journalières moyennes en sulfates des industries sur le bassin de la rivière Sainte-Anne par carreau partiel (Morin et al., 1985; Scott's Industrial Directories, 1980; Jorgensen, 1979; INRS-Eau - Groupe Système Urbain, 1973)

Références												
CP	I	J	Lieu	Industrie ou production industrielle	Nombre d'employés (personnes)	Consommation d'eau par employé (l/j/pers.)	Concentration de l'effluent (mg/l)	Production de sulfates (kg/j)				
1	12	11	A	Ste-Anne-de-la-Pérade	Lait évaporé, beurre	83	3 593	32	~ 9,5			
					Poudre de lait							
					Bonbons	2	1 109	—	~ 0			
					Boulangerie	4	1 001	—	~ 0			
					Margarine	28	3 593	6	0,6			
					Confection de vêtements	45	1 360	—	~ 0			
					moulée	2	—	—	—			
					Mobilier métallique	10	—	—	—			
			Total				10					
3	12	12	A	St-Casimir	Équipements de scierie	20	1 460	—	~ 0			
					Tuyaux de béton	4	1 270	—	~ 0			
					Planage de bois contre-plaqué	3	1 020	—	~ 0			
					Moulée	67	—	—	~ 0			
						13	—	—	~ 0			
								Total				~ 0
6	13	12	A	St-Alban	Beurre	7	3 593	32	0,8			
					Bois brut	15	—	—	~ 0			
					Bois sciage	6	—	—	~ 0			
					Équipement hydraulique	7	1 455	—	~ 0			
								Total				1

Tableau 8: Estimation des productions journalières moyennes en sulfates des industries sur le bassin de la rivière Sainte-Anne par carreau partiel (Morin et al., 1985; Scott's Industrial Directories, 1980; Jorgensen, 1979; INRS-Eau - Groupe Système Urbain, 1973)

7	11 13 A	St-Ubalde	Boulangerie	13	1 001	—	~ 0
			Confection de vêtements	60	1 360	—	~ 0
			Bois de construction	12	—	—	~ 0
			Bois de sciage	15	—	—	~ 0
			Total				~ 0
16	14 13 A	Ste-Christine	Charbon de bois	11	—	—	~ 0
			Total				~ 0
18	14 14 B	St-Léonard-de-Portneuf	Portes, chassis	2	—	—	~ 0
			Reconstruction de démarreurs, générateurs	4	—	—	~ 0
			Charpentes de bois	3	—	—	~ 0
			Bois de construction	12	—	—	~ 0
			Total				~ 0
27	15 14 A	St-Raymond	Charbon de bois	10	—	—	~ 0
			Charbon de bois	12	—	—	~ 0
			Fromagerie	4	3 593	32	0,5
			Imprimerie	6	68	~ 0	~ 0
			Imprimerie	1	68	~ 0	~ 0
			Planage de bois	30	1 020	—	~ 0
			Papier	150	11 075	200	332
			Bois de sciage	40	—	—	~ 0
			Laiterie	50	3 593	32	5,7
			gants	20	—	—	~ 0
			Sciure de bois, savon	3	500	~ 0	~ 0
			Armoires de bois	6	—	—	~ 0
			Meubles de bois	200	—	—	~ 0
			Bois de sciage	50	—	—	~ 0
			Béton, gravier	100	1 270	~ 0	~ 0
			Traitement du bois	12	—	~ 0	~ 0
Total				338			

Tableau 9: Production ponctuelle journalière en sulfates de la population humaine sur le bassin de la rivière Sainte-Anne répartie par carreau partiel (Morin et al., 1985; Statistique Canada, 1982a; OPDQ, 1979; MAS, 1978 et 1981)

Références		Population desservie par un égout (personnes)	Production (kg SO ₄ /j)	
CP	I J		avril à nov.	déc. à avril
1	12 11 A	La Pérade - village	1 039	
		Ste-Anne-de-la-Pérade - paroisse	1 218	
		Total	2 257	16 50
2	11 11 A	St-Prosper-de-Champlain - paroisse	454	3 10
3	12 12 A	St-Casimir - village	1 042	
		St-Casimir - paroisse	--	
		St-Casimir - est - village	362	
		St-Thuribe - Paroisse	226	
		Total	1 630	12 36
6	13 12 A	St-Alban - village	673	
		St-Alban - paroisse	--	
		Total	673	5 15
7	11 13 A	St-Ubalde	281	2 6
16	14 13 A	Ste-Christine - paroisse	94	1 2
18	14 14 B	St-Léonard-de-Portneuf	191	1 4
27	15 14 A	St-Raymond - ville	3 551	
		St-Raymond - paroisse	942	
		Total	4 493	33 99

Sainte-Anne, la période d'épandage de sels de déglacage est supposée s'étendre du 1^{er} décembre au 15 avril environ.

4.2.5 Estimation de PS_{ani} pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

Les productions moyennes journalières des sulfates sur les carreaux entiers par les porcs, les bovins, les chevaux et les poulets (PS_{ani}) sont estimées, d'après l'équation (34). Les valeurs de PS_{ani} obtenues sont présentées au tableau 10.

4.2.6 Estimation de PS_{eng} pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

Les valeurs estimées de PS_{eng} (tableau 11) sont calculées selon la méthode présentée à la section 4.1.6, soient 5% de la masse totale d'engrais épandus sur un carreau donné.

4.2.7 Estimation de COS_p pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

Le bassin versant de la rivière Sainte-Anne se trouvant à la fois sur le Bouclier canadien et les Basses-Terres du Saint-Laurent, des valeurs de concentrations de 10,3 mg/l ou 15,2 mg/l seront attribuées à chaque carreau entier selon la formation géologique prédominante (tableau 12).

4.2.8 Estimation de D_{ani} et de D_{eng} pour le bassin versant de la rivière Sainte-Anne

Les valeurs utilisées pour les coefficients mensuels d'épandage des fumiers d'animaux d'élevage (D_{ani}) et d'engrais chimiques (D_{eng}) sur le bassin

Tableau 10: Production potentielle de sulfates des populations animales sur le bassin de la rivière Sainte-Anne, ventilée sur les carreaux entiers (Morin et al., 1985; Statistique Canada, 1982b)

Références			Population estimée				Production potentielle de SO ₄ (kg/j)
CE	I	J	Porcs	Bovins	Chevaux	Poulets	
1	12	11	--	1 518	20	200	149
2	11	11	--	501	24	31	51
3	12	12	50	3 600	21	334	353
4	11	12	717	1 635	48	190	174
5	12	13	26	2 054	12	181	201
6	13	12	--	1 366	6	148	134
7	11	13	597	1 518	17	169	159
8	12	14	--	951	9	90	93
9	13	13	516	1 457	9	177	150
10	11	14	--	140	2	11	14
11	12	15	--	--	--	--	--
12	13	14	1 153	217	6	21	39
13	14	13	577	122	4	18	21
14	14	14	791	394	9	1 351	54
15	15	13	--	--	--	--	--
16	13	15	--	648	10	20	64
17	14	15	10	309	5	6 697	37
18	15	14	8	155	2	5 357	21
19	13	16	5	92	1	3 348	12
20	15	15	14	257	4	9 375	35
21	14	16	8	147	2	5 357	20
22	15	16	11	202	3	7 366	28
23	16	15	4	73	1	2 679	10
24	16	16	3	55	1	2 009	7
25	15	17	--	--	--	--	--
26	16	17	--	--	--	--	--
27	17	16	--	--	--	--	--
28	14	17	6	110	2	4 018	15
29 - 43			--	--	--	--	--

Tableau 11: Estimation des charges moyennes journalières de sulfates (PS_{eng}) provenant des engrais chimiques épandus sur chaque carreau entier (CE) du bassin versant de la rivière Sainte-Anne

CE	I	J	Quantité annuelle d'engrais épandu (t/an) (1)	PS_{eng} (2) (kg/j)
1	12	11	301	41
2	11	11	87	12
3	12	12	466	64
4	11	12	386	53
5	12	13	764	105
6	13	12	292	40
7	11	13	873	120
8	12	14	312	43
9	13	13	487	67
10	11	14	97	13
11	12	15	--	0
12	13	14	172	24
13	14	13	71	10
14	14	14	117	16
15	15	13	--	0
16	13	15	251	34
17	14	15	58	8
18	15	14	18	2
19	13	16	18	2
20	15	15	55	8
21	14	16	18	2
22	15	16	55	8
23	16	15	18	2
24	16	16	18	2
25	15	17	--	0
26	16	17	--	0
27	17	16	--	0
28	14	17	18	2
29 - 43			--	0

(1) Statistique Canada, 1982b

(2) $PS_{eng} = (\text{quantité annuelle d'engrais épandu}) \cdot 10^3 \text{kg/t} \cdot 5\% \div 365 \text{ j/an}$

Tableau 12: Estimation de la concentration en sulfates des eaux souterraines (COS_p) se trouvant sur le bassin versant de la rivière Sainte-Anne d'après l'origine des eaux souterraines (McCormack, 1983; Morin et al., 1984)

References			
CE	I	J	COS _p (mg/l)
1	12	11	15,2
2	11	11	15,2
3	12	12	15,2
4	11	12	15,2
5	12	13	15,2
6	13	12	15,2
7	11	13	15,2
8	12	14	10,3
9	13	13	15,2
10	11	14	10,3
11	12	15	10,3
12	13	14	10,3
13	14	13	10,3
14	14	14	15,2
15 à 43			10,3

de la rivière Sainte-Anne sont présentées au tableau 13.

4.3 Valeurs de départ des paramètres CX_F , a , b , M_{sol} , θ , $K_{S_{20}}$, K_D et P_{nap} suggérées pour le bassin de la rivière Sainte-Anne.

Paramètre	Valeur initiale	Intervalle suggérée
CX_F	1,0	(0,5 - 1,5)
a	10,0	(1 - 30)
b	0,4	(0,3 - 0,8)
M_{sol}	220 kg/m ²	(80 - 1100)
θ	1,08	(1,05 - 1,12)
$K_{S_{20}}$	0,0 j ⁻¹	(0,0 - 0,1)
K_D	0,0 j ⁻¹	(0,0 - 0,1)
P_{nap}	1,0	(0,0 - 1,0)

La mise en opération du modèle de sulfates nécessite l'entrée des données décrites à la section 4.2 et des paramètres mentionnés ci-haut. En outre, il faut spécifier la concentration initiale moyenne des sulfates en rivière le premier jour de simulation. Pour le bassin de la rivière Sainte-Anne, cette concentration initiale est fixée à 3,0 mg/l. Enfin, la période pendant laquelle la charge additionnelle en sulfates des sels de déglacement sera considérée, est fixée du 1^{er} décembre au 30 mars.

4.4 Calibration du modèle et résultats

Les banques de données physiographiques et météorologiques préparées dans le cadre de la présente étude sur le bassin de la rivière Sainte-Anne (Portneuf) sont décrites dans le rapport sur la modélisation de la

Tableau 13: Estimés des coefficients mensuels d'épandage des fumiers (D_{ani}) et des engrais chimiques (D_{eng}) sur le bassin de la rivière Sainte-Anne (Morin et al., 1985).

Mois	D_{ani}	D_{eng}
Janvier	0	0
Février	0	0
Mars	0	0
Avril	0	1
Mai	2	6
Juin	2	4
Juillet	1	0
Août	1	0
Septembre	1	1
Octobre	1	0
Novembre	0	0
Décembre	0	0

température de l'eau à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU (Morin et al., 1983).

L'ajustement du modèle des sulfates nécessite premièrement la calibration du modèle hydrologique CEQUEAU (Morin et al., 1981) de façon à reproduire le mieux possible les débits observés. Par la suite, les paramètres relatifs à la production et à la dégradation des sulfates sur le bassin versant sont ajustés. Les concentrations en sulfates mesurées à La Pérade de 1975 à 1980 par le ministère de l'Environnement du Québec (MENVIQ, non daté) ont servi aux simulations.

Afin de contourner le problème d'initialisation des différents stocks de sulfates calculés par le modèle de sulfates et des stocks de neige calculés par le modèle hydrologique, il est préférable de débiter les simulations une année avant le début des valeurs mesurées. Les simulations présentées (1975 à 1980) suivent donc une année de simulation à vide, i.e. sans valeurs observées pour l'année 1974. L'estimation des paramètres est faite par essais et erreurs, c'est-à-dire qu'après une première simulation, les valeurs sont modifiées pour la simulation suivante et les résultats sont comparés. Ce processus se répète jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants.

Dans la présente simulation, les paramètres ont été calibrés pour les années 1975 et 1976 seulement. Les années 1977 à 1980 sont des années de vérification. À partir de ce paragraphe, pour une meilleure compréhension du modèle, l'identification des principaux paramètres sera suivie du nom de la variable correspondante utilisée dans le programme informatique. La procédure générale suivante a été suivie. Le paramètre de contribution de

nappe (P_{nap} ou PASNAP) a d'abord été modifié afin d'obtenir, lors de l'étiage hivernal, des concentrations calculées qui soient comparables aux valeurs observées. Rappelons que lors de l'étiage hivernal, l'écoulement souterrain contribue de façon très importante au débit. La valeur finale retenue pour le paramètre PASNAP (0,5) est la même que celle du paramètre de nappe utilisé dans le modèle de température de l'eau (Morin et al., 1983).

Par la suite, les stocks de sulfates accumulés dans le réservoir "sol" ont été ajustés à l'aide des paramètres de dégradation correspondants (K_S ou DESSUR et Θ ou TETAS). Compte tenu que la concentration en sulfates dans le réservoir "sol" (CHS_{sol} ou SULEQ) dépend d'une fonction de puissance du stock d'azote au sol (CHS_{sol} , équation 12c), les paramètres DESSUR et TETAS se sont avérés très sensibles. Il est à noter que lorsqu'on augmente la valeur de la constante de correction de la dégradation au sol selon la température (TETAS), les stocks de sulfates au sol sont supérieurs en hiver et inférieurs en été quand la température moyenne de l'air dépasse 20°C. Une mauvaise calibration des paramètres DESSUR et TETAS peut résulter en une augmentation inter-annuelle régulière des stocks de sulfates au sol et, par conséquent, des concentrations calculées en rivière.

Les coefficients "a" et "b" de l'équation de Freundlich (FREUA, FEUB) donnant la concentration en sulfates du réservoir "sol" (CHS_{sol} ou SSUSUR) ont ensuite été modifiés. Le paramètre FREUB est le plus important puisqu'il affecte la puissance de l'équation de Freundlich (équation 12c). Une augmentation de FREUB permet de désensibiliser cette équation, c'est-à-dire de rendre les concentrations calculées de sulfates dans le réservoir "sol" moins dépendantes des variations de stocks de sulfates au

sol. Les coefficients FREUA et FREUB affectent aussi dans une certaine mesure les stocks de sulfates au sol, puisque des concentrations calculées supérieures correspondent à un déstockage plus rapide et des concentrations calculées inférieures correspondent à un déstockage moins rapide.

Le coefficient d'ajustement de la concentration des eaux de fonte (CX_F ou CXFOSU) permet de faire correspondre au mieux les pointes calculées et observées du choc acide au printemps. Lorsqu'on diminue CXFOSU, les concentrations en sulfates des eaux de fonte sont inférieures et la pointe des fortes concentrations, lors des premières journées de fonte, se trouve amortie et retardée. L'intégration des équations de calcul de la concentration des eaux de fonte, telles que développées par Jones et al. (1985, 1986), s'est avérée satisfaisante.

Il a été supposé que les sulfates en rivière ne subissent pas de dégradation décelable et par conséquent, le coefficient de dégradation des sulfates en rivière (K_D ou DESRIV) a été fixé à 0,0. Pour sa part, le paramètre M_{sol} ou SOLMAS exprimant la masse de sol pouvant servir de réservoir de sulfates, par unité de surface, a plutôt été considéré comme une donnée d'entrée et sa valeur n'a pas été modifiée. Le paramètre M_{sol} a été fixé à 220 kg/m².

Enfin, les données suivantes ont également été fournies: la concentration de sulfates en rivière le premier jour de simulation (SULINI): 3,0 mg/l; le jour de l'année où débutent les charges supplémentaires de sulfates des sels de déglacage (JOSELD): 335; le jour de l'année où

finissent les charges supplémentaires de sulfates des sels de déglacage (JOSELF): 90.

Les données d'entrée utilisées pour les simulations présentées sont celles décrites à la section 4.2. Les valeurs retenues des différents paramètres ainsi que les données supplémentaires requises apparaissent à la page suivante:

<u>PARAMÈTRE OU DONNÉE</u>	<u>VALEUR</u>	<u>INTERVALLE DE CALIBRATION</u>
Concentration moyenne de sulfates en rivière le premier jour de simulation (SULINI)	3,0 mg/l	
Coefficient d'ajustement de la concentration des eaux de fonte (CXFOSU)	0,5	0,3 - 1,0
Coefficient "a" de l'équation de Freundlich (FREUA)	3,0	3,0 - 10,0
Coefficient "b" de l'équation de Freundlich (FREUB)	0,6	0,4 - 0,6
Masse moyenne du réservoir "sol" par unité de surface (M_{sol} ou SOLMAS)	220 kg/m ²	
Constante de correction de la dégradation des sulfates au sol selon la température (Θ ou TETAS)	1,08	1,05 - 1,10
Coefficient de dégradation des sulfates au sol (K_S ou DESSUR)	0,05	0,0 - 0,1
Coefficient de dégradation des sulfates en rivières (K_D ou DESRIV)	0,0	
Paramètre de contribution des eaux souterraines (P_{nap} ou PASNAP)	0,5	0,3 - 1,0
Jour de départ de la charge en sulfates des sels de déglacage (JOSELD)		
Jour de fin de la charge en sulfates des sels de déglacage (JOSELF)	335	

Les résultats des simulations à La Pérade pour les années 1975 à 1980 apparaissent aux figures 4.1 à 4.6 respectivement ainsi qu'au tableau 14. Ces premiers résultats montrent que le modèle permet de reconstituer l'allure générale des concentrations observées, sans toutefois reproduire les variations à échelle plus fine (hebdomadaire). Les concentrations mesurées présentent une variabilité relativement élevée et une comparaison satisfaisante des valeurs observées et calculées nécessiterait un plus grand nombre d'observations. En outre, et surtout, les données de concentrations des précipitations et d'apports par dépôts secs pour les années de simulation sont requises. Ces deux sources de sulfates sont en effet déterminantes et ne peuvent être estimées adéquatement par l'utilisation de moyennes inter-annuelles. Cette lacune dans les données d'entrée fait que la calibration des paramètres du modèle n'a pas été poussée trop loin. On note également que le modèle sous-estime les concentrations en automne, autour du mois de septembre. Ceci pourrait être causé par une sous-évaluation des charges d'origine diffuse pendant cette période comme déterminées par les facteurs mensuels de production. Lors de cette première calibration, il a aussi été constaté que l'équation de Freundlich (équation 12c) constitue le noeud du modèle de sulfates. Des recherches visant à donner un sens plus physique aux paramètres qui interviennent dans cette équation seraient donc souhaitables.

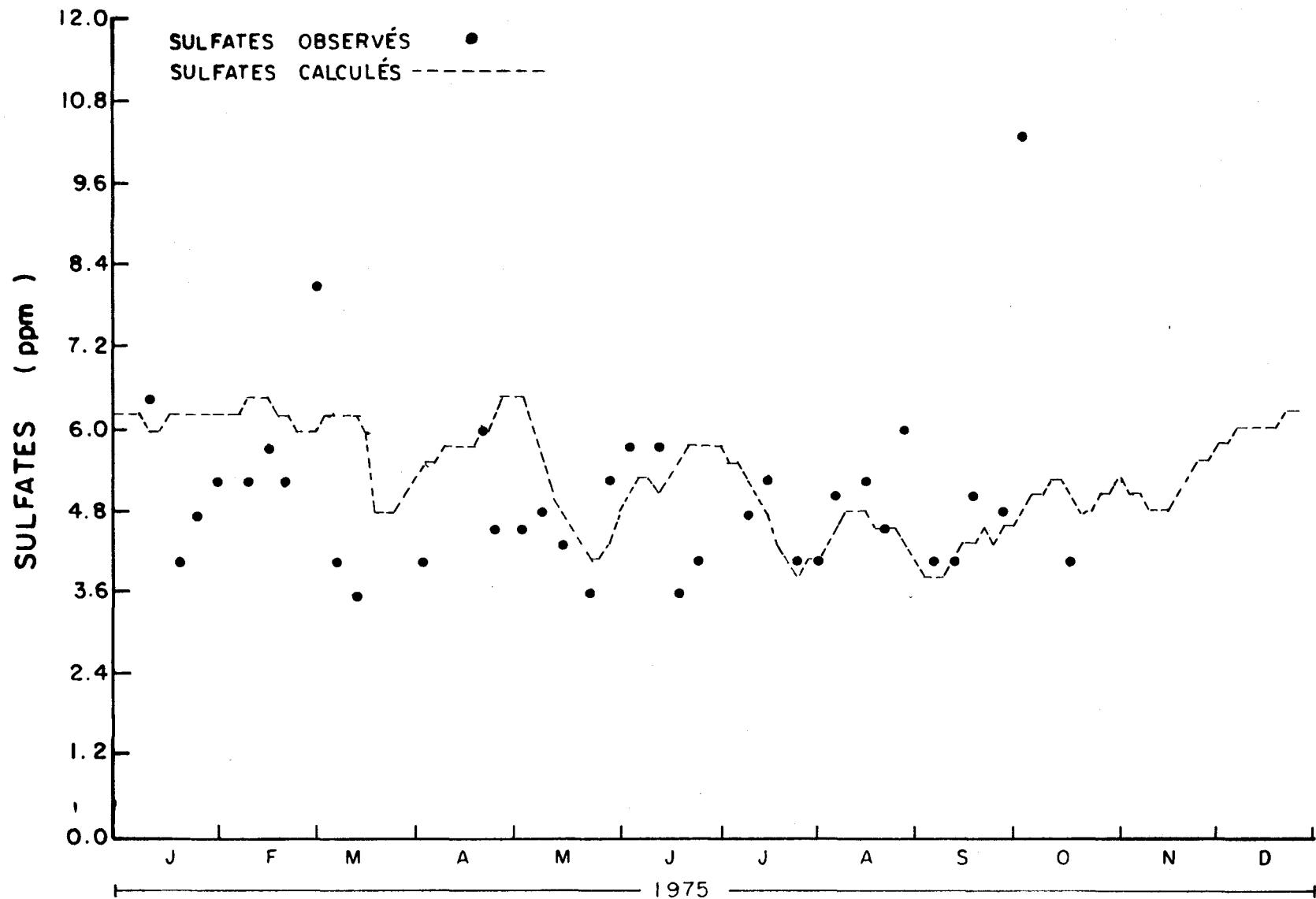


Figure 4.1: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1975.

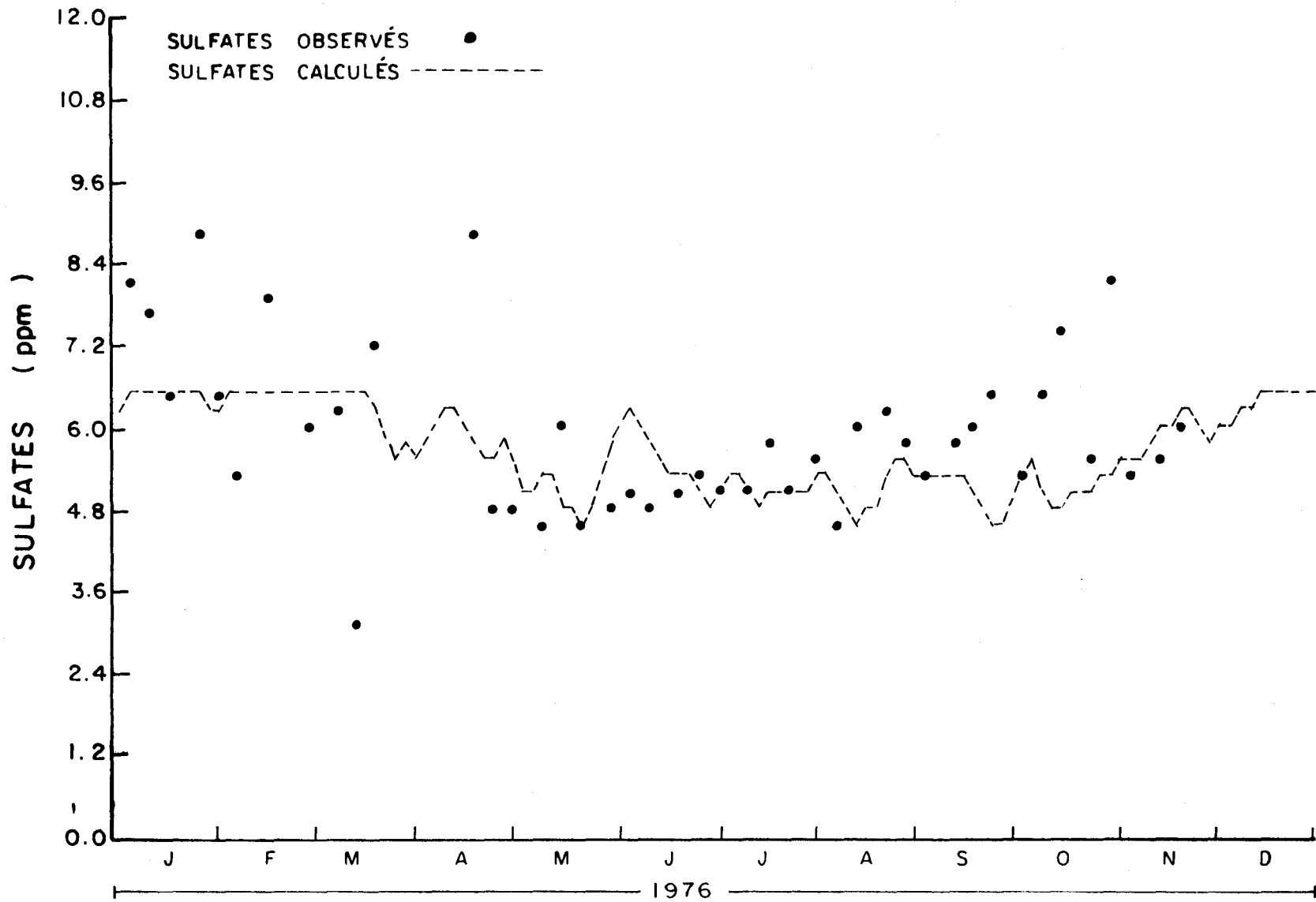


Figure 4.2: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1976.

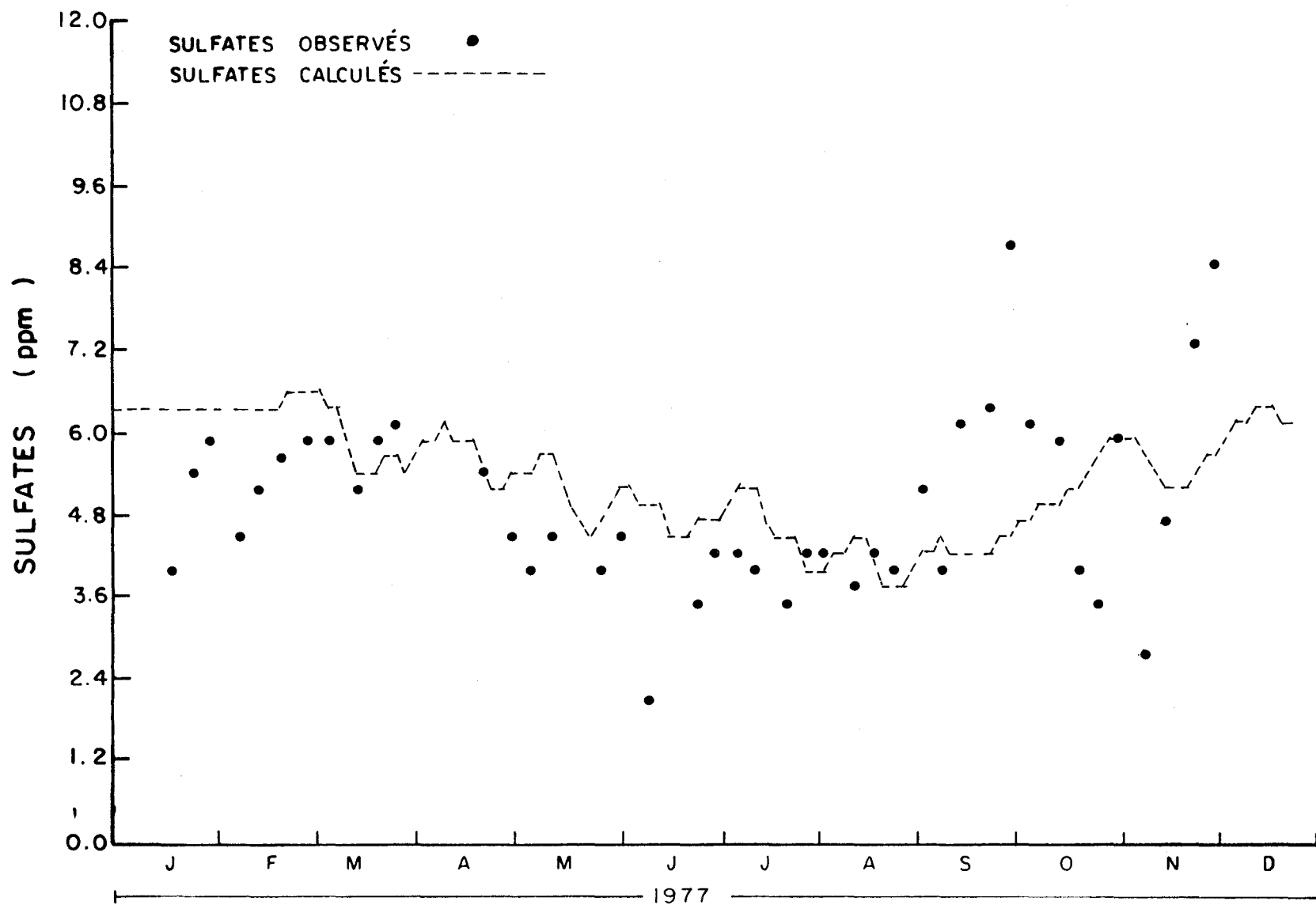


Figure 4.3: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1977.

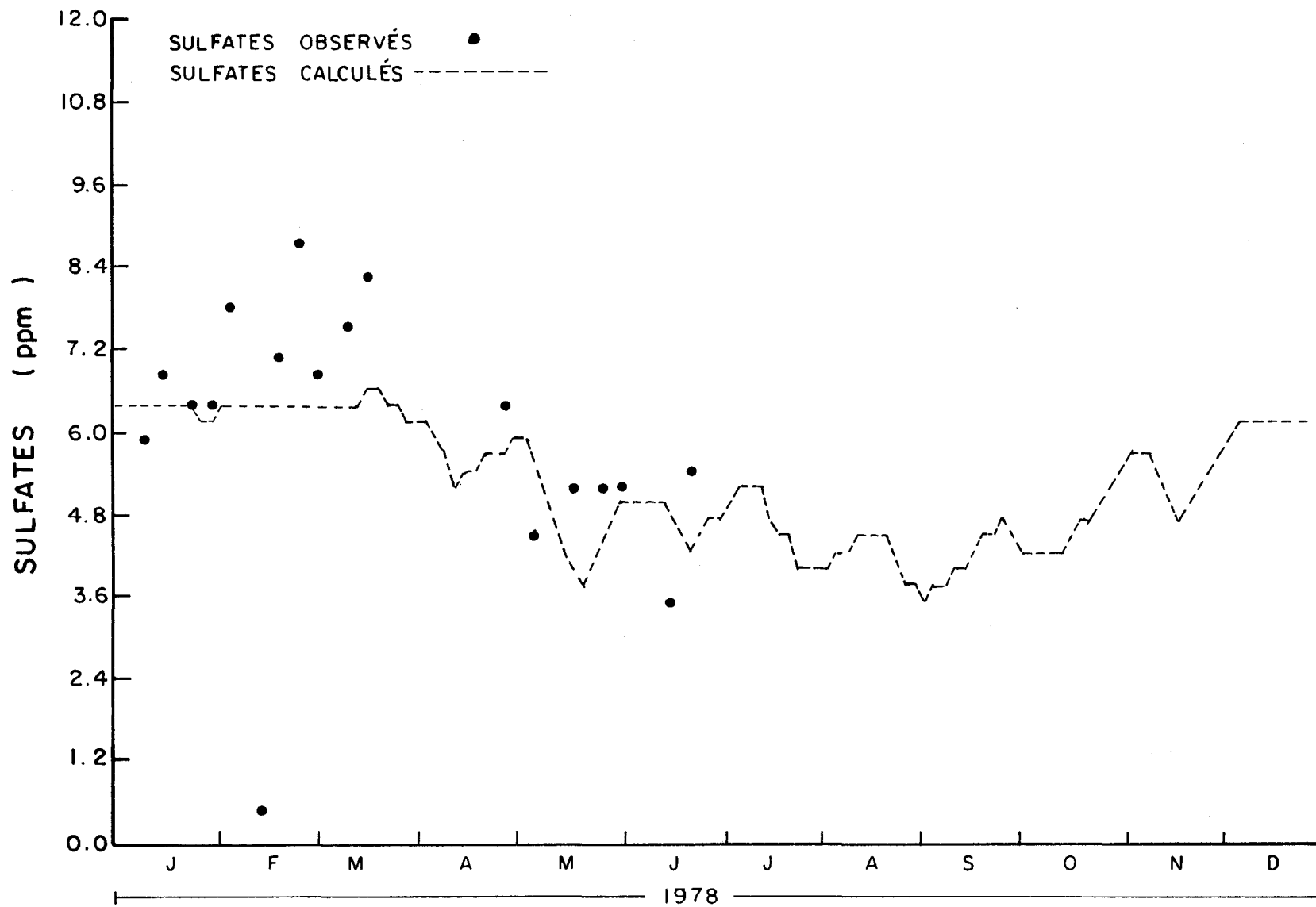


Figure 4.4: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1978.

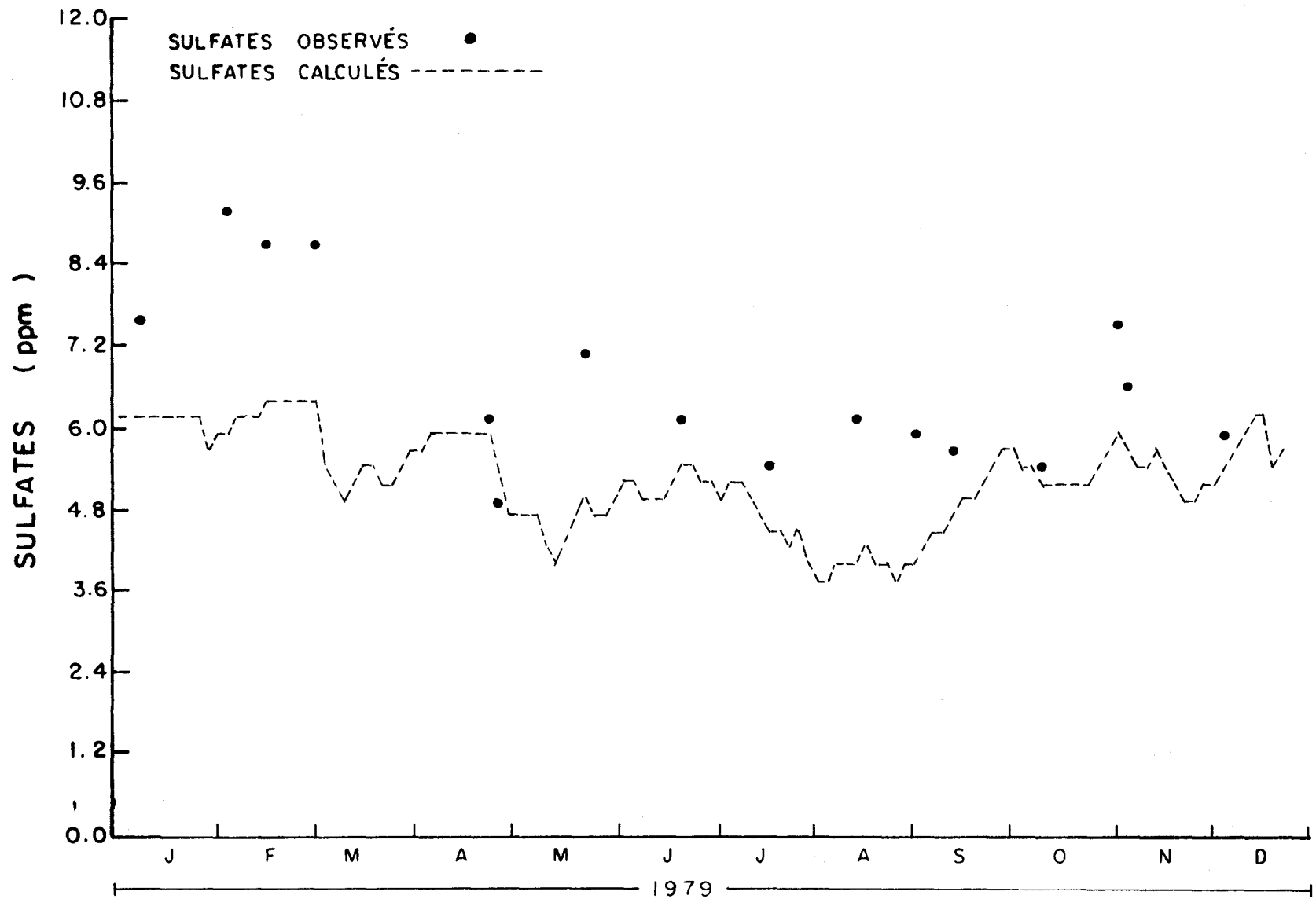


Figure 4.5: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1979.

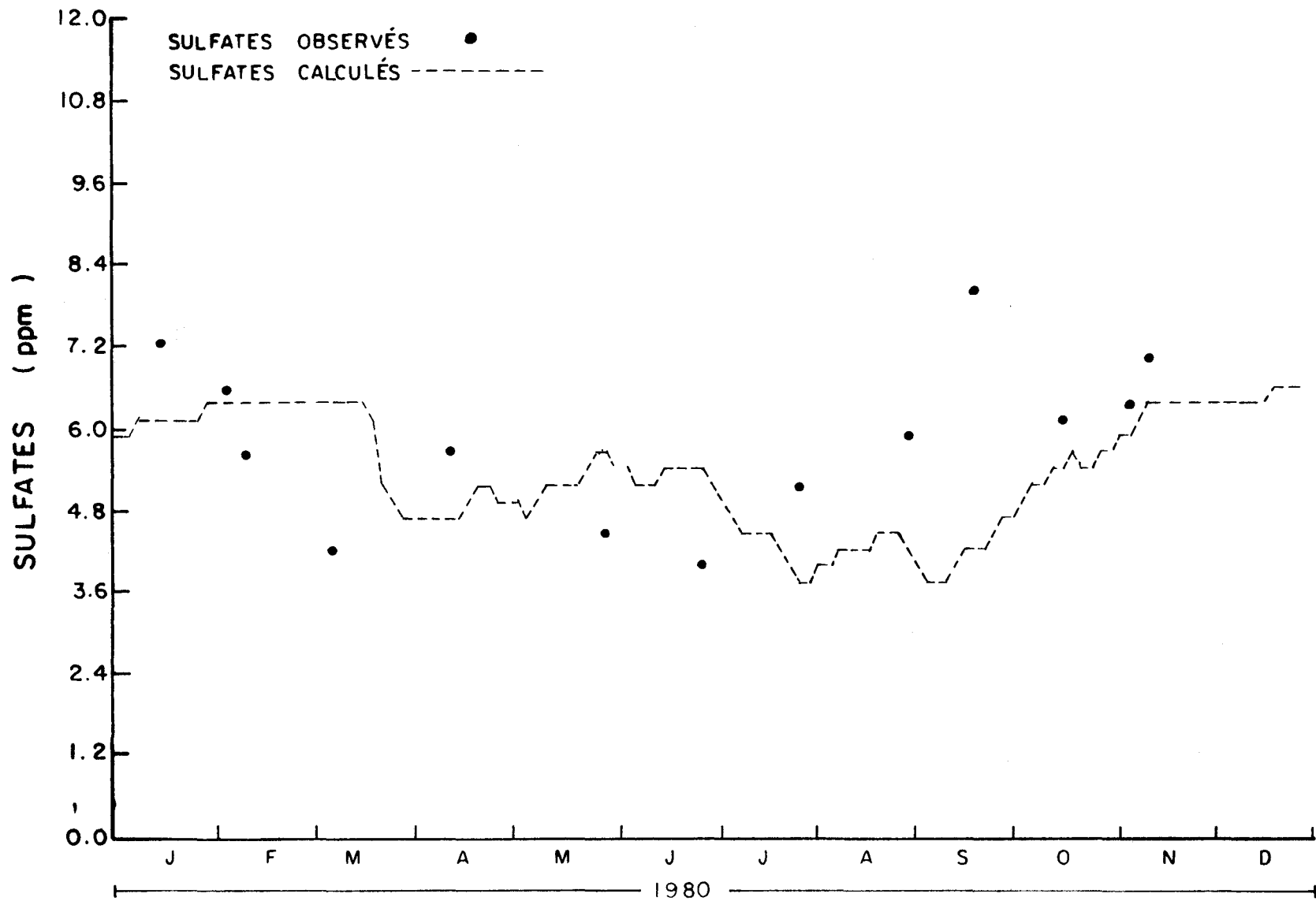


Figure 4.6: Concentrations en sulfates calculées (moyenne de trois jours) et observées à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour l'année 1980.

Tableau 14: Concentration (ppm) moyenne mensuelle de sulfates observée et calculée à La Pérade sur la rivière Sainte-Anne pour les années 1975 à 1980.

ANNEE		MOIS											
		Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1975	O	5,13	5,43	5,27	4,90	4,30	4,92	4,67	5,02	4,45	7,30	*	*
	C	6,24	6,30	5,68	5,78	5,07	5,25	4,92	4,57	4,19	4,96	5,09	5,98
1976	O	7,80	6,48	5,53	6,90	4,94	5,05	5,20	5,60	5,95	6,60	5,73	*
	C	6,38	6,44	6,23	5,82	5,07	5,56	5,04	5,10	5,11	5,11	5,85	6,32
1977	O	5,23	5,40	5,83	5,60	4,28	3,43	4,16	4,15	5,50	5,76	5,33	8,70
	C	6,53	6,59	5,95	5,84	5,27	4,91	1,86	4,18	4,37	5,13	5,66	6,21
1978	O	6,55	6,15	7,73	6,60	5,13	4,90	*	*	*	*	*	*
	C	6,41	6,50	6,56	5,78	4,87	4,78	4,84	4,28	4,15	4,57	5,41	6,15
1979	O	7,60	9,05	9,00	5,70	7,10	6,20	5,50	6,30	5,90	5,60	7,25	6,00
	C	6,26	6,33	5,49	5,90	4,66	5,19	4,90	4,03	4,77	5,45	5,53	5,69
1980	O	7,50	6,25	4,30	5,80	*	4,25	5,20	*	7,05	6,20	6,80	*
	C	6,25	6,45	6,00	4,97	5,31	5,45	4,60	4,31	4,17	5,35	6,30	6,56

* Non disponible

O Valeurs observées

C Valeurs calculées

CONCLUSION

La sous-routine "SULFAT" du modèle CEQUEAU permet de simuler l'allure générale des concentrations de sulfates en rivière. Pour cela, elle comprend une fonction de production (apports ponctuels et diffus de sulfates) et une fonction de transfert (transport en rivière). Les apports "naturels" (précipitations, dépôts secs, eaux souterraines) et les apports d'origine anthropique directs (engrais, épandage de fumiers et purins, sels de déglçage, rejets municipaux et industriels) sont pris en considération. Le modèle tient aussi compte indirectement des phénomènes de réduction des sulfates et de l'adsorption par les sols. L'effet de concentration observé lors de la fonte des neiges a été rendu.

Outre certains apports ponctuels particuliers, les apports d'origine atmosphérique (précipitations, dépôts secs) constituent les sources majeures de sulfates sur un bassin versant. C'est cependant la capacité d'adsorption et de désorption des sols du bassin qui déterminera les concentrations présentes dans les eaux de surface. Les variations dans les apports sont ainsi amorties par l'influence du réservoir "sol". Le modèle pourrait donc permettre de constater l'évolution à long terme des concentrations de sulfates dans les eaux douces et de mettre en évidence un éventuel stockage de sulfates sur le bassin. Le modèle présenté devra toutefois être appliqué sur plusieurs bassins versants différents avec des séries de données complètes afin de vérifier son adéquation.

REFERENCES

- ASSOCIATION DES FABRICANTS D'ENGRAIS DU QUÉBEC (1984). Statistiques 1983-1984, Montréal, novembre 1984.
- BARRIE, L.A., K. ANLAUF, H.A. WIEBE, P. FELLIN (1984). Acidic pollutants in air and precipitation at selected rural locations in Canada. dans B.B. Hicks (éd.). Deposition both wet and dry. Acid precipitation series, vol. 4 J. I. Teasley (éd.). Butterworth Publishers, Boston, pp. 15-35.
- BARRIE, L.A., H.A. WIEBE, K. ANLAUF, P. FELLIN (1982). Results of the canadian air and precipitation monitoring network APN: July 1980 to December 1981. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, rapport interne AQRB-82-009-T, 6 pp., 7 annexes.
- CACCIA, C. (1984). Note pour l'allocution du Ministre de l'Environnement du Canada à la Conférence ministérielle Canado-Européenne sur les pluies acides, Ministère de l'Environnement du Canada, Ottawa, 20 mars 1984.
- CHRISTOPHERSEN, N., L.H. DYMBE, M. JOHANNESSEN, H.M. SEIP (1984). A model for sulphate in streamwater at Storgama, Southern Norway. Ecol. Model. 21: 35-61.
- CNRC (1977). Sulphur and its inorganic derivatives in the canadian environment. Publication no. NRCC 15015 du Secrétariat à l'environnement, NRC associate committee on scientific criteria for environmental quality. Conseil national de recherches du Canada (CNRC), Ottawa, 426 p.

- CRONAN, C.S. (1980). Controls on leaching from coniferous forest floor microcosms. *Plant and Soil*, 56: 301-322.
- ENVIRONNEMENT CANADA (1984). Données de la station APN de la Forêt Montmorency, janvier 1982 - novembre 1982, Service de l'environnement atmosphérique, Région du Québec.
- ENVIRONNEMENT CANADA (1986). Données de la station APN de la Forêt Montmorency, décembre 1982 - juillet 1983, Service de l'environnement atmosphérique, Région du Québec.
- FITZGERALD, J.W., T.C. STRICKLAND, W.T. SWANK (1982). Metabolic fate of inorganic sulphate in soil samples from undisturbed and managed forest ecosystems. *Soil Biol. Biochem.* 14(6): 529-536.
- FULLER, R.D., M.B. DAVID, C.T. DRISCOLL (1985). Sulfate adsorption relationships in forested spodosols of the northeastern USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 1034-1040.
- GARRELS, R.M., F.T. MACKENZIE, C. HUNT (1975). Chemical cycles and the global environment. William Kaufmann, Inc., Los Altos (California), 206 pp.
- GRIMARD, Y. (1984). Réseau d'échantillonnage des précipitations du Québec: Sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1981-1982-1983. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction générale des inventaires et de la recherche, Service de la qualité des eaux. Publ. PA-11, 163 pp.

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

JOHNSON, D.W., D.W. COLE (1977). Sulfate mobility in an outwash soil in Western Washington. Water, Air and Soil Poll., 7: 489-495.

JOHNSON, D.W., G.S. HENDERSON (1979). Sulfate adsorption and sulfur fractions in a highly weathered soil under a mixed deciduous forest. Soil Sci., 128(1): 34-40.

JOHNSON, D.W., D.E. TODD (1983). Relationships among iron, aluminium, carbon and sulfate in a variety of forest soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 47: 792-800.

JONES, H.G., W. SOCHANSKA, J.Y. CHARETTE, J. STEIN (1985). Aspect qualitatif du développement au bassin du lac Laflamme d'un modèle prédictif de l'impact des précipitations acides - phase de la fonte printanière de 1984. INRS-Eau, rapport scientifique no 182, 42 p., 12 t., 36 f. (pour le compte d'Environnement Canada).

JONES, H.G., W. SOCHANSKA, J.Y. CHARETTE, J. STEIN (1986). Aspect qualitatif du développement au bassin du lac Laflamme d'un modèle prédictif de l'impact des précipitations acides - phase de la fonte printanière de 1985. INRS-Eau, rapport scientifique no 196, Sainte-Foy (Québec), (pour le compte d'Environnement Canada), 63 pp.

JORGENSEN, S.E. (1979). Industrial waste water management. Studies in environmental science. vol. 5, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 380 pp.

KHANNA, P.K., F. BEESE (1978). The behavior of sulfate on salt input in podzolic brown earth. Soil Sci., 125(1): 16-21.

MCCORMACK, R. (1983). Étude hydrogéologique: Rive nord du Saint-Laurent. Rapport HG 15. Ministère de l'Environnement du Québec, Service des eaux souterraines, Québec, 412 p., 11 cartes en annexe.

MAPAQ (1978). Fumier de ferme. Conseil des productions végétales du Québec. Adgex 538. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Gouvernement du Québec, Québec, 4p.

MENVIQ (non daté). Banque de données de la qualité du milieu aquatique. Service de la qualité des eaux. N.P. Ministère de l'Environnement du Québec, Québec.

MAPAQ (1982). Fumiers: rapport du colloque sur les fumiers. Conseil des productions végétales du Québec. Adgex 538, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Gouvernement du Québec, Québec, 83 p.

MAS (1978). Inventaire national des équipements en eau des municipalités du Canada 1977. Publ. Cat. no EM44-10/1977. Ministère des Approvisionnement et Services Canada. 339 p.

MAS (1981). Inventaire national des équipements en eau des municipalités du Canada 1981. Publ. Cat. no EN44-10/81. Ministère des Approvisionnement et Services Canada 389 pp.

MORIN, G., COUILLARD, D., CLUIS, D., JONES, G.H. et J.M. GAUTHIER (1987). Prévision des températures de l'eau en rivière à l'aide d'un modèle conceptuel. Hydrological Sciences Journal, 32(1): 31-41.

MORIN, G., COUILLARD, D., CLUIS, D., JONES, G.H. et J.M. GAUTHIER (1986). Modélisation des solides dissous en rivière à l'aide des composantes de l'écoulement. Canadian Journal of Civil Engineering, 13(2): 196-203.

MORIN, G., D. CLUIS, D. COUILLARD, H.G. JONES, J.M GAUTHIER (1985). Modélisation de l'azote total à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU. INRS-Eau, rapport scientifique no 184, Sainte-Foy (Québec), 83 pp.

MORIN, G., D. COUILLARD, D. CLUIS, H.G. JONES, J.M. GAUTHIER (1984a). Modélisation des solides dissous à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU, INRS-Eau, rapport scientifique no 160, Sainte-Foy (Québec), 127 pp.

MORIN, G., CLUIS, D., COUILLARD, D., JONES, H.G. et J.M. GAUTHIER (1984b). Modélisation de l'oxygène dissous et de la demande biochimique en oxygène à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU. INRS-Eau, rapport scientifique no 155, 96 p. (pour Hydro-Québec).

- MORIN, G., COUILLARD, D., CLUIS, D., JONES, H.G. et J. DUPONT (1983a).
Modélisation des solides en suspension à l'aide du modèle
quantité-qualité CEQUEAU, INRS-Eau, rapport scientifique no 154, 124 p.
(pour Hydro-Québec).
- MORIN, G., CLUIS, D., COUILLARD, D., JONES, H.G. et J.M. GAUTHIER (1983b).
Modélisation de la température de l'eau à l'aide du modèle
quantité-qualité CEQUEAU. INRS-Eau, rapport scientifique no 153,
103 p. (pour Hydro-Québec).
- MORIN, G., J.P. FORTIN, J.P. LARDEAU, W. SOCHANSKA, S. PAQUETTE (1981).
Modèle CEQUEAU: manuel d'utilisation. INRS-Eau, rapport scientifique
no 93, Sainte-Foy (Québec), 449 pp.
- OPDQ (1979). Banque de données statistiques par bassin géographique.
Éditeur officiel du Québec, Office de Planification et de Développement
du Québec, 252 pp.
- OVERREIN, L.N., H.M. SEIP, A. TOLLAN (1980). Acid precipitation - effects
on forest and fish. Final report SNSF-Project 1972-1980, Oslo, 175 p.
- RUSTAD, S., N. CHRISTOPHERSEN, H.M. SEIP, P.J. DILLON (1986). Model for
streamwater chemistry of a tributary to Harp Lake, Ontario. Can. J.
Fish. Aquat. Sci. 43: 625-633.
- SCOTT'S INDUSTRIAL DIRECTORIES (1980). Répertoire industriel du Québec.
10^e éd., Oakville (Ontario).

SEIP, H.M., R. SEIP, P.J. DILLON, E. DE GROSOIS (1985). Model of sulphate concentration in a small stream in the Harp Lake catchment, Ontario. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42: 927-937.

SHEIH, C.M., M.L. WESELY, B.B. HICKS (1979). Estimated dry deposition velocities of sulfur over the eastern United States and surrounding regions. Atm. Environ. 13: 1361-1368.

SIMARD, G., R. DES ROSIERS (1979). Qualité des eaux souterraines du Québec. Ministère des richesses naturelles du Québec, Service des eaux souterraines. Publ. H.G.-13., 160 pp.

SINGH, B.R. (1984a). Sulfate sorption by acid forest soils: 1. Sulfate adsorption isotherms and comparison of different adsorption equations in describing sulfate adsorption. Soil Sci. 138(3): 189-197.

SINGH, B.R. (1984b). Sulfate sorption by acid forest soils: 2. Sulfate adsorption isotherms with and without organic matter and oxides of aluminium and iron. Soil Sci. 138(4): 294-297.

SINGH, B.R. (1984c). Sulfate sorption by acid forest soils: 3. Desorption of sulfate from adsorbed surfaces as a function of time, desorbing ion, pH, and amount of adsorption. Soil Sci. 138(5): 346-353.

SINGH, B.R. (1984d). Sulfate sorption by acid forest soils: 4. Kinetics and effects of temperature and moisture. Soil Sci. 138(6): 440-447.

SINGH, B.R., G. ABRAHAMSEN, A. STUANES (1980). Effect of simulated acid rain on sulfate movement in acid forest soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 75-80.

STATISTIQUE CANADA (1982a). Recensement du Canada de 1981 - Population - Répartition géographique - Québec. Ministère des Approvisionnements et Services Canada. Publ. Cat. 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.

STUMM, W., J.J. MORGAN (1981). Aquatic chemistry. 2^e éd., John Wiley & Sons, New York, 780 pp.

WIKLANDER, L. (1975). The role of neutral salts in the ion exchange between acid precipitation and soil. Geoderma, 14: 93-105.

WIKLANDER, L. (1980). Interaction between cations and anions influencing adsorption and leaching. dans, T.C. Hutchinson et M. Havas (éds), Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, Plenum Press, New York, 654 pp.

ANNEXE I

Résumé des équations et variables du modèle

Résumé des équations du modèle de simulation des concentrations de sulfates en rivière

$$COS_{ex} = \frac{CHS_{init} + CHS_{am} + CHS_{pon} + (CHS_{loc} \cdot R_{cp})}{V_{dil}} \cdot e^{-K_D \Delta t} \quad (10)$$

$$CHS_{init} = COS_{ex\ j-1} \cdot V'_{cp} \quad (27)$$

$$V'_{cp} = (L \cdot W \cdot P) + V'_{var} \quad (28)$$

$$CHS_{am} = \sum_{i=1}^n (COS_{ex\ i} \cdot V_i) \quad (29)$$

$$CHS_{pon} = CHS_{mun} + CHS_{ind} \quad (26)$$

$$CHS_{loc} = (V_R \cdot COS_{\acute{e}q}) + (V_H \cdot COS_H) + (V_S \cdot COS_S) + (V_L \cdot COS_{PPT}) \quad (11)$$

$$COS_S = P_{nap} \cdot COS_P + (1 - P_{nap}) \cdot COS_{\acute{e}q} \quad (12a)$$

$$COS_H = (COS_S + COS_{\acute{e}q})/2 \quad (12b)$$

$$COS_{\acute{e}q} = 3,0 \cdot [CHS_{sol} / (a \cdot M_{sol} \cdot S_{sol})]^{1/b} \quad (12c)$$

$$CHS_{sol} = [CHS_{sol_0} + CHS_{atm} + (D_{ani} \cdot PS_{ani}) + (D_{eng} \cdot PS_{eng})] \cdot e^{-K_S \Delta t} \quad (13)$$

$$K_S = K_{S_{20}} \cdot \Theta^{T-20} \quad (14)$$

Selon la période de l'année et l'endroit, on peut avoir:

a) absence d'accumulation de neige:

$$CHS_{atm} = CHS_{DS} + CHS_{PPT} \quad (15)$$

b) accumulation de neige au sol sans fonte

$$CHS_{atm} = 0 \quad (16)$$

$$CHS_{N j} = CHS_{N j-1} + CHS_{DS} + CHS_{PPT} \quad (17)$$

c) accumulation de neige au sol avec fonte

$$CHS_{atm} = CHS_F + (H_{PPTeff} \cdot \cos_{PPT} \cdot S_N) \quad (18)$$

$$CHS_F = \cos_F \cdot H_F \cdot S_N \quad (20)$$

$$\cos_F = CX_F \cdot \frac{\cos_N^0}{(H_{N j-1} - H_{N j})} \cdot [H_{N j-1} \cdot \exp(-K_F (H_N^0 - H_{N j-1})) - H_{N j} \cdot \exp(-K_F (H_N^0 - H_{N j}))] \quad (19)$$

$$K_F = (7,60 \times 10^{-2} \cdot \cos_N^0) - (1,43 \times 10^{-2}) \quad (21)$$

$$\text{COS}_N^{\circ} = \frac{\text{CHS}_N^{\circ}}{H_N^{\circ} \cdot S_N} \quad (22)$$

$$H_N^{\circ} = H_{N \ j-1} + H_{\text{PPTret}} \quad (23)$$

$$\text{CHS}_{N \ j} = \text{CHS}_{N \ j-1} - \text{CHS}_F + (H_{\text{PPTret}} \cdot S_N \cdot \text{COS}_{\text{PPT}}) + \text{CHS}_{\text{DS}} \quad (24)$$

$$\text{CHS}_{\text{sol}}^1 = \text{CHS}_{\text{sol}} - \text{CHS}_{\text{ent}} \quad (25)$$

$$\text{ou } \text{CHS}_{\text{ent}} = V_R \cdot \text{COS}_{\text{éq}}$$

$$V_{\text{dil}} = V'_{\text{cp}} + V_{\text{am}} + V_{\text{loc}} \quad (30)$$

Équations complémentaires

$$\text{CHS}_{\text{mun}} = N_{\text{hum}} \cdot (\text{PUS}_{\text{hum}} + \text{PUS}_{\text{sel}}) \quad (33)$$

$$\text{CHS}_{\text{ind}} = \sum_{i=1}^{\text{ind}} (\text{NE}_i \cdot \text{CE}_i \cdot \text{COS}_{\text{ind } i}) \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \text{PS}_{\text{ani}} = & (\text{PUS}_{\text{por}} \cdot N_{\text{por}}) + (\text{PUS}_{\text{bov}} \cdot N_{\text{bov}}) + (\text{PUS}_{\text{che}} \cdot N_{\text{che}}) \\ & + (\text{PUS}_{\text{pou}} \cdot N_{\text{pou}}) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\text{CHS}_{\text{DS}} = (v_{\text{SO}_4} \cdot [\text{SO}_4]_{\text{air}}) + (v_{\text{SO}_2} \cdot [\text{SO}_2]_{\text{air}} \cdot \frac{\text{PM}_{\text{SO}_4}}{\text{PM}_{\text{SO}_2}}) \quad (31)$$

Définition des variables du modèle

- a : coefficient de l'équation de Freundlich;
- b : coefficient de l'équation de Freundlich;
- CE_i : consommation journalière d'eau par employé pour le type d'industrie i (l/pers);
- CHS_{am} : charge en sulfates journalière provenant des carreaux partiels immédiatement en amont (kg);
- CHS_{atm} : charge en sulfates journalière d'origine atmosphérique parvenant au sol sur un carreau entier (kg);
- CHS_{DS} : charge en sulfates journalière provenant des dépôts secs (kg);
- CHS_{ent} : charge en sulfates journalière du sol entraînée par ruissellement sur un carreau entier (kg);
- CHS_F : charge en sulfates journalière libérée par la fonte du couvert de neige sur un carreau entier (kg);
- CHS_{ind} : charge en sulfates journalière moyenne provenant de rejets industriels sur le carreau partiel (kg);
- CHS_{init} : charge en sulfates journalière initiale sur le tronçon de rivière au début du jour (kg);
- CHS_{loc} : charge en sulfates journalière locale apportée par les différentes formes d'écoulement sur un carreau entier (kg);
- CHS_{mun} : charge en sulfates journalière moyenne provenant de rejets municipaux sur le carreau partiel (kg);
- $CHS_{N j}$: charge en sulfates du couvert de neige pour le jour de simulation (kg);
- CHS_N^0 : charge en sulfates du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte (kg);

- $CHS_{N\ j-1}$: charge en sulfates du couvert de neige le jour précédent (kg);
- CHS_{pon} : charge en sulfates journalière d'origine ponctuelle sur un carreau partiel (kg);
- CHS_{PPT} : charge en sulfates journalière moyenne des précipitations sur l'ensemble du bassin versant (kg);
- CHS_{sol} : charge en sulfates journalière accumulée dans et sur le sol, disponible pour être entraînée par les eaux (kg);
- CHS_{sol_0} : charge en sulfates journalière accumulée dans et sur le sol à la fin du jour précédent, après lessivage (kg);
- CHS'_{sol} : charge en sulfates journalière accumulée dans le sol à la fin du jour, après lessivage (kg);
- $COS_{\acute{e}q}$: concentration en sulfates à l'équilibre de l'eau du sol en surface (mg/l);
- COS_{ex} : concentration en sulfates à l'exutoire d'un carreau partiel à la fin du jour (mg/l);
- $COS_{ex\ i}$: concentration en sulfates à l'exutoire du carreau partiel "i" en amont (mg/l);
- $COS_{ex\ j-1}$: concentration en sulfates à l'exutoire d'un carreau partiel à la fin du jour précédent (mg/l);
- COS_F : concentration en sulfates des eaux de fonte (mg/l);
- COS_H : concentration en sulfates de l'écoulement hypodermique (mg/l);
- $COS_{ind\ i}$: concentration en sulfates moyenne de l'effluent industriel "i" (mg/l);

- COS_N^O : concentration en sulfates du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte continu (mg/l);
- COS_{PPT} : concentration en sulfates des précipitations journalières (mg/l);
- COS_P : concentration en sulfates des eaux souterraines profonde sur le carreau entier (mg/l);
- COS_S : concentration moyenne en sulfates de l'écoulement souterrain (mg/l);
- CX_F : coefficient d'ajustement de la concentration en sulfates des eaux de fonte (environ 1.0);
- D_{ani} : coefficient mensuel de production de fumier par les animaux;
- D_{eng} : coefficient mensuel d'épandage des engrais chimiques;
- H_F : lame journalière d'eau de fonte (mm);
- $H_{N j}$: équivalence en eau du couvert de neige pour le jour de simulation (mm);
- $H_{N j-1}$: équivalence en eau du couvert de neige pour le jour précédent (mm);
- H_N^O : équivalence en eau du couvert de neige au tout début d'un épisode de fonte continu (mm);
- H_{PPT} : lame journalière de précipitation sur le carreau entier (mm);
- H_{PPTeff} : lame journalière de précipitation efficace (non retenue dans le couvert de neige) (mm);
- H_{PPTret} : lame journalière de précipitation retenue dans le couvert de neige (mm);
- ind : nombre d'industries sur un carreau partiel;
- j : jour de simulation;
- K_D : coefficient de disparition des sulfates en rivière (j^{-1});

- K_F : coefficient de lessivage des sulfates du couvert de neige lors d'un épisode de fonte continu sur un carreau entier (mm^{-1});
- K_S : coefficient de déperdition des sulfates accumulés dans le sol à la température T (j^{-1});
- $K_{S_{20}}$: coefficient de déperdition des sulfates accumulés dans le sol à 20°C (j^{-1});
- L : longueur du tronçon de rivière sur le carreau partiel (km);
- M_{sol} : masse moyenne de sol agissant comme réservoir de sulfates, par unité de surface (kg/m^2);
- n : nombre de carreaux partiels en amont;
- N_{bov} : population de bovins sur un carreau entier (animaux);
- N_{che} : population de chevaux sur un carreau entier (animaux);
- N_{hum} : population humaine sur un carreau entier (personnes);
- N_{por} : population de porcs sur un carreau entier (animaux);
- N_{pou} : population de poulets sur un carreau entier (animaux);
- NE_i : nombre d'employés dans l'industrie "i" (personnes);
- P : profondeur minimale du tronçon de rivière (m);
- PS_{ani} : production moyenne journalière potentielle de sulfates par les animaux sur un carreau entier (kg);
- P_{nap} : paramètre d'ajustement de la contribution des eaux souterraines profondes (entre 0.0 et 1.0);
- PM_{SO_4} : poids moléculaire de SO_4 (g mol^{-1});
- PM_{SO_2} : poids moléculaire de SO_2 (g mol^{-1});

- PS_{eng} : production moyenne journalière potentielle des sulfates par les engrais chimiques épandus sur un carreau entier (kg);
- PUS_{bov} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un bovin (kg/animal);
- PUS_{che} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un cheval (kg/animal);
- PUS_{hum} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un humain (kg/pers.);
- PUS_{por} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un porc (kg/animal);
- PUS_{pou} : charge moyenne journalière potentielle de sulfates produite par un poulet (kg/animal);
- PUS_{sel} : charge moyenne journalière de sulfates apportée par l'épandage de sel de déglacage (kg/personne);
- R_{cp} : rapport de la surface du carreau partiel sur la surface du carreau entier;
- S_{CE} : surface réelle du carreau entier (km²);
- S_N : surface recouverte de neige sur le carreau entier (km²);
- $[SO_2]_{air}$: concentration de SO₂ dans l'air (g/m³);
- $[SO_4]_{air}$: concentration de SO₄ particulaire dans l'air (g/m³);
- S_{sol} : surface de sol sur un carreau entier (km²);
- Δt : pas de temps de la simulation (j);
- T : température du sol en surface (°C);

- v_{SO_2} : vitesse de déposition de SO_2 (mm/j);
- v_{SO_4} : vitesse de déposition de SO_4 particulaire (mm/j);
- V_{am} : volume d'eau journalier provenant des carreaux partiels en amont (milliers de m^3);
- V'_{cp} : volume d'eau du tronçon de rivière sur le carreau partiel à la fin du jour précédent (milliers de m^3);
- V_{dil} : volume d'eau total de dilution sur chaque carreau partiel (milliers de m^3);
- V_H : volume d'eau journalier de l'écoulement hypodermique (milliers de m^3);
- V_i : volume d'eau journalier provenant du carreau partiel "i" en amont (milliers de m^3);
- V_L : Volume journalier des eaux de débordement des lacs et marais sur un carreau entier (milliers de m^3);
- V_{loc} : volume journalier des différents écoulements sur un carreau partiel (milliers de m^3);
- V_R : volume journalier des eaux de ruissellement sur un carreau entier (milliers de m^3);
- V_S : volume journalier de l'écoulement souterrain sur un carreau entier (milliers de m^3);
- V'_{var} : volume d'eau accumulé à la fin du jour précédent sur le carreau partiel variant en fonction du débit (milliers de m^3);

W : largeur du tronçon de rivière (m);

θ : constante empirique pour la correction du coefficient de
déperdition des sulfates au sol selon la température
(légèrement supérieure à 1,0).

ANNEXE II

Déroulement de la sous-routine et correspondance
des variables du modèle et des variables informatiques

Déroulement de la sous-routine de simulation des concentrations en sulfates

A) calcul de la production locale en sulfates sur les carreaux entiers

Pour chacun des carreaux entiers, on calcule l'apport journalier au sol d'origine atmosphérique (CHS_{atm})

Si $H_N = 0$, alors cas #4

Si $H_N \neq 0$ et $H_F = 0$, alors cas #3

Si $H_N \neq 0$ et $H_F \neq 0$ et $H_{F j-1} \neq 0$ et $H_{PPT} = 0$, alors cas #2

Si $H_N \neq 0$ et $H_F \neq 0$ et ($H_{F j-1} = 0$ ou $H_{PPT} \neq 0$), alors cas #1, puis cas #2

Cas #1: initialisation des paramètres concernant le stock de neige au début d'un épisode de fonte

$$H_N^o = H_{N j-1} + H_{PPTret}$$

$$COS_N^o = \frac{CHS_N^o}{H_N^o \cdot S_N}$$

Cas #2: fonte du couvert de neige

$$K_F = (7,60 \times 10^{-2} \cdot COS_N^o) - (1,43 \times 10^{-2})$$

$$\text{COS}_F = \text{CX}_F \cdot \frac{\text{COS}_N^{\circ}}{(\text{H}_{N \ j-1} - \text{H}_{N \ j})} [\text{H}_{N \ j-1} \cdot \exp(-K_F (\text{H}_N^{\circ} - \text{H}_{N \ j-1})) - \text{H}_{N \ j} \cdot \exp(-K_F (\text{H}_N^{\circ} - \text{H}_{N \ j}))]$$

$$\text{CHS}_F = \text{COS}_F \cdot \text{H}_F \cdot \text{S}_N$$

$$\text{CHS}_{\text{atm}} = \text{CHS}_F + (\text{H}_{\text{PPTeff}} \cdot \text{COS}_{\text{PPT}} \cdot \text{S}_N)$$

$$\text{CHS}_{N \ j} = \text{CHS}_{N \ j-1} - \text{CHS}_F + (\text{H}_{\text{PPTret}} \cdot \text{S}_N \cdot \text{COS}_{\text{PPT}}) + \text{CHS}_{\text{DS}}$$

Cas #3: accumulation de neige au sol sans fonte

$$\text{CHS}_{N \ j} = \text{CHS}_{N \ j-1} + \text{CHS}_{\text{DS}} + \text{CHS}_{\text{PPT}}$$

$$\text{CHS}_{\text{atm}} = 0$$

Cas #4: absence de couvert de neige

$$\text{CHS}_{\text{atm}} = \text{CHS}_{\text{DS}} + \text{CHS}_{\text{PPT}}$$

Fin du calcul de CHS_{atm} et suite du calcul de la population locale sur le carreau entier

$$\text{CHS}_{\text{sol}} = [\text{CHS}_{\text{sol}0} + \text{CHS}_{\text{atm}} + (\text{D}_{\text{ani}} \cdot \text{PS}_{\text{ani}}) + (\text{D}_{\text{eng}} \cdot \text{PS}_{\text{eng}})] \cdot e^{-K_S \Delta t}$$

$$\text{COS}_{\text{éq}} = 3,0 \cdot [\text{CHS}_{\text{sol}} / (a \cdot M_{\text{sol}} \cdot S_{\text{sol}})]^{1/b}$$

$$\text{COS}_S = P_{\text{nap}} \cdot \text{COS}_P + (1 - P_{\text{nap}}) \cdot \text{COS}_{\text{éq}}$$

$$\text{COS}_H = (\text{COS}_S + \text{COS}_{\text{éq}}) / 2$$

$$\text{CHS}_{\text{ent}} = V_R \cdot \text{COS}_{\text{éq}}$$

$$\text{CHS}'_{\text{sol}} = \text{CHS}_{\text{sol}} - \text{CHS}_{\text{ent}}$$

$$\text{CHS}_{\text{loc}} = \text{CHS}_{\text{ent}} + V_H \cdot \text{COS}_H + (V_S \cdot \text{COS}_S) + (V_L \cdot \text{COS}_{\text{PPT}})$$

B) Calcul des concentrations en sulfates sur les carreaux partiels

$$\text{CHS}_{\text{am}} = \sum_{i=1}^n (\text{COS}_{\text{ex } i} \cdot V_i)$$

$$V'_{\text{cp}} = (L \cdot W \cdot P) + V'_{\text{var}}$$

$$\text{CHS}_{\text{init}} = \text{COS}_{\text{ex } j-1} \cdot V'_{\text{cp}}$$

$$V_{\text{dil}} = V'_{\text{cp}} + V_{\text{am}} + V_{\text{loc}}$$

$$\text{COS}_{\text{ex}} = \frac{\text{CHS}_{\text{init}} + \text{CHS}_{\text{am}} + [\text{CHS}_{\text{mun}} + \text{CHS}_{\text{ind}}] + (\text{CHS}_{\text{loc}} \cdot R_{\text{cp}})}{V_{\text{dil}}} \cdot e^{-K_D \Delta t}$$

Correspondance des variables du modèle et des variables informatiques:

Variable du modèle	Variable informatique
a	FREUA
b	FREUB
CHS _{am}	CHSUAM
CHS _{atm}	CHSUAT
CHS _{DS}	CHDSSU ou CSULDS
CHS _{ent}	CHSENT
CHS _F	CHSUFO
CHS _{ind} + CHS _{mun}	CHSPO ou CHSPON
CHS _{init}	CHSRES
CHS _{loc}	CHSLOC
CHS _{N j}	CHSNE
CHS _{N j-1}	CHSNEP
CHS _{N^o}	CHSNEP
CHS _{pon}	CHSPO ou CHSPON
CHS _{PPT}	CSULPH * SCE
CHS _{sol}	SSUSU
CHS _{sol₀}	SSUSUR
CHS' _{sol}	SSUSUR
COS _{éq}	SULEQ
COS _{ex}	SULFA
COS _{ex j-1}	SULFA
COS _F	SULFON

COS _H	SULHYP
COS _i	SULFA
COS _N ^o	SULNEO
COS _{PPT}	SUPPT ou SULPPT
COS _P	SULNAP
COS _S	SULNA
CX _F	CXFOSU
D _{eng}	DISULE
D _{ani}	DISULA
H _F	FONSOL
H _{N j}	STONE
H _{N j-1}	STONEP
H _N ^o	STONEO
H _{PPT}	PPTO ou PPTTOT
H _{PPTeff}	PPEF
H _{PPTret}	PPTRET
K _D	DESRIV
K _F	CFONT
K _S	DESSUR * TETAS ** (TJET - 20.0)
K _{S20}	DESSUR
(L · W)	SURFRI
M _{sol}	SOLMAS
P	PROMIN
PS _{ani}	CSANI
PS _{eng}	CSENG
P _{nap}	PASNAP

R _{cp}	SURFCP
S _{CE}	SCE
S _N	SCE
S _{sol}	SCE * PCTERR
T	TJET
V _{am}	VOLAM
V' _{cp}	VOLRES
V _{dil}	VOLDIL
V _H	SOLT*PCTERR*CEKM2
V _i	SORPAR
V _L	SLAMAT*PCEAU*CEKM2
V _{loc}	VOLLOC
V _R	RUISST*PCTERR*CEKM2
V _S	SONAPT*PCTERR*CEKM2
V' _{var}	VOLCP
(W * L)	SURFRI
θ	TETAS