

## LAVSED-I — Un modèle pour prédire l'érosion des bassins et le transfert de sédiments fins dans les cours d'eau nordiques

M. FRENETTE ET P. Y. JULIEN<sup>1</sup>

*Département de génie civil, Université Laval, Québec (Qué.), Canada G1K 7P4*

Reçu le 5 novembre 1984

Révision acceptée le 14 novembre 1985

L'ordinateur est un outil de premier ordre pour prédire, au niveau d'un bassin versant, les pertes de sol associées à l'action érosive de l'eau et les charges sédimentaires en suspension subséquentes transférées aux cours d'eau. Le déroulement de cette étude a conduit au développement du modèle LAVSED-I (le modèle LAVal SEDimentologique) lequel inclut quatre composantes: précipitation, caractéristiques du bassin, érosion/sédimentation et utilisation du territoire. Basé sur l'équation universelle de perte de sol de Wischmeier et Smith et l'équation de Kilinc et Richardson, le modèle peut accommoder une combinaison de diverses unités de taille et de forme de bassins divisés selon une grille spatiale variant de 0,03 à 3000 km<sup>2</sup>. Le présent article décrit le développement opérationnel et l'application du modèle à l'échelle d'un prototype, soit le bassin de la rivière Chaudière (B.V. = 5830 km<sup>2</sup>). Les résultats montrent la cartographie de l'érosion des bassins ainsi que la charge sédimentaire observée dans le cours d'eau.

Computer modeling techniques are used for predicting soil losses from overland flow and subsequent suspended sediment yield from large watersheds. The model LAVSED-I (LAVal SEDimentological model No. 1) is based on the universal soil-loss equation of Wischmeier and Smith and the equation of Kilinc and Richardson. The model subdivides the watershed into square units varying in size from 0.3 to 3000 km<sup>2</sup> and the computational procedure is subdivided in four components: precipitation, physical characteristics of watersheds, erosion/sedimentation, and land use. This paper describes the operational development and the application of the model to a prototype-scale watershed. A map for the annual soil loss is presented for the Chaudière watershed (area = 5830 km<sup>2</sup>). Results of mapping compared with the sediment yield observed are shown in the paper.

Can. J. Civ. Eng. 13, 150-161 (1986)

### Introduction

Chaque bassin hydrographique est lié à une ou plusieurs activités qui gouvernent l'érosion des bassins et l'apport solide dans les cours d'eau. Ainsi, parvenir à estimer la dégradation d'un bassin et la rattacher aux activités humaines, c'est aussi parvenir à se donner des outils de prédiction et partant des outils de gestion. Tel est le but du présent article de présenter les grandes lignes d'une simulation mathématique réalisée à l'Université Laval visant à prédire l'érosion des bassins et l'apport solide dans les cours d'eau, en relation avec les activités du territoire.

Sur les bassins versants, on distingue généralement six types d'érosion: érosion en nappe (dite superficielle), érosion en rigoles, ravinement, érosion de lit et des berges des cours d'eau et glissements de terrain. De nombreuses recherches (Meyer 1971; Wischmeier 1959, 1973; Piest et Miller 1977) soulignent cependant, qu'au niveau des bassins soumis aux activités humaines (ex.: par le déboisement et l'agriculture) l'érosion superficielle constitue la majeure partie des sédiments transportés dans les cours d'eau.

Il existe actuellement plusieurs méthodes permettant de quantifier l'érosion superficielle à l'échelle de petites parcelles, parmi lesquelles on retrouve l'équation universelle de perte de sol (Wischmeier et Smith 1965) basée principalement sur l'intensité des pluies et l'équation de Kilinc et Richardson (1973) reliant l'érosion aux caractéristiques hydrauliques de ruissellement.

Les principales causes de l'érosion superficielle et la prédiction du taux d'érosion est suffisamment précise pour résoudre les problèmes sur une petite échelle. Par contre, à l'échelle de

grands bassins versants, l'évaluation du taux d'érosion ainsi que les apports sédimentaires dans les cours d'eau constitue un défi majeur. En effet, il faut composer avec de grandes superficies fort diversifiées, une gamme de données subissant des variations spatio-temporelles et des paramètres qui interfèrent les uns sur les autres. La variété des paramètres et l'interaction simultanée de plusieurs processus reliés à l'eau, aux sols et aux plantes limitent les efforts de recherche en vue d'établir des cartes d'érosion superficielle sur de grandes superficies.

Grâce à l'ordinateur et aux techniques d'analyse moderne, la physique du phénomène basé sur la simulation mathématique permet désormais d'identifier une variété de conditions relatives au processus d'érosion des bassins et à la charge sédimentaire fine transférée aux cours d'eau. Ainsi il devient possible d'analyser une grande quantité de données afin de produire des cartes d'érosion utiles et fiables à un coût minimal basées sur l'utilisation maximale des données disponibles tant au niveau du terrain que d'analyse de relevés. Par analyse de relevés on entend cartes topographiques, cartes géologiques, cartes pédologiques, cartes pluviométriques, cartes forestières et agricoles, photos aériennes, etc. Les observations sur le terrain sont d'autre part de grande utilité pour arriver à calibrer les modèles de simulation. Ces données étant, tout au moins pour les cartes des bassins, relativement facile à obtenir, même dans les régions les plus déshéritées, il devient impérieux d'en tirer le meilleur parti possible. Dans le cadre de la présente recherche, le modèle LAVSED-I a été appliqué sur le bassin de la rivière Chaudière, tributaire du Saint-Laurent (voir fig. 1) situé dans la partie sud-est de la province de Québec (Canada).

### Approche fondamentale

À l'échelle d'une parcelle expérimentale, l'approche la plus connue pour estimer l'érosion superficielle à partir de l'intensité des pluies est l'équation universelle de perte de sol (USLE) développée par Wischmeier et Smith (1965). Plus

NOTE: Les commentaires sur le contenu de cet article doivent être envoyés par écrit au directeur de la revue avant le 31 juillet 1986 (voir l'adresse au verso de la page du couvert).

<sup>1</sup>L'adresse courante: Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO, U.S.A.

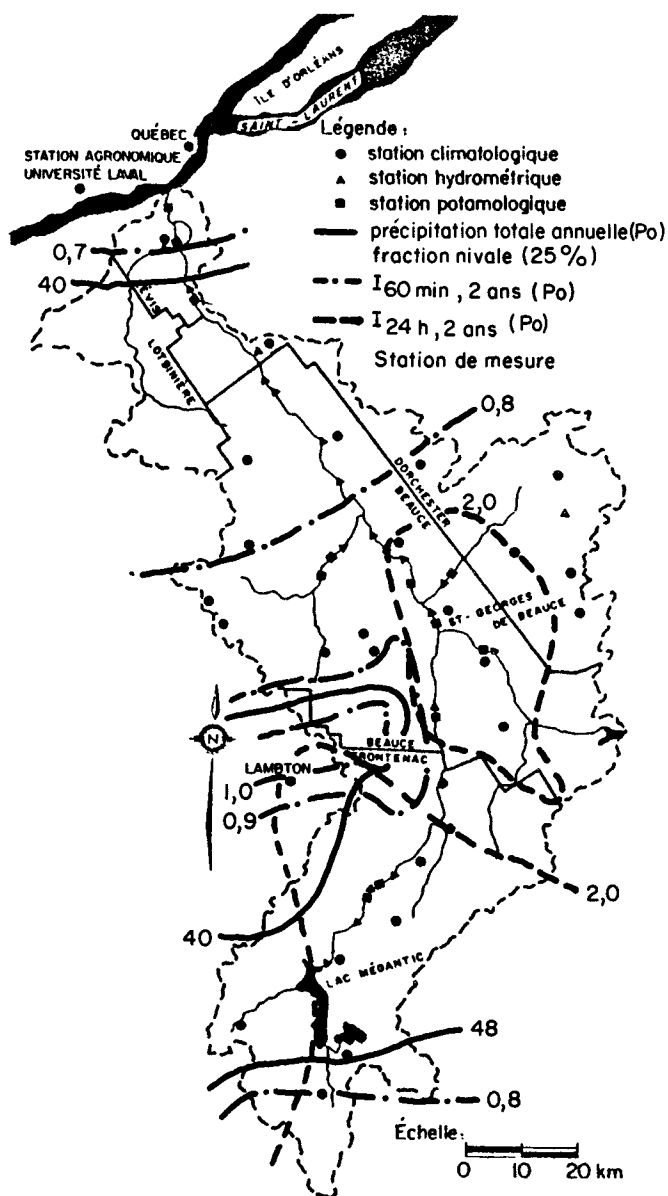


FIG. 1. Plan de localisation du bassin de la rivière Chaudière et courbes de précipitations.

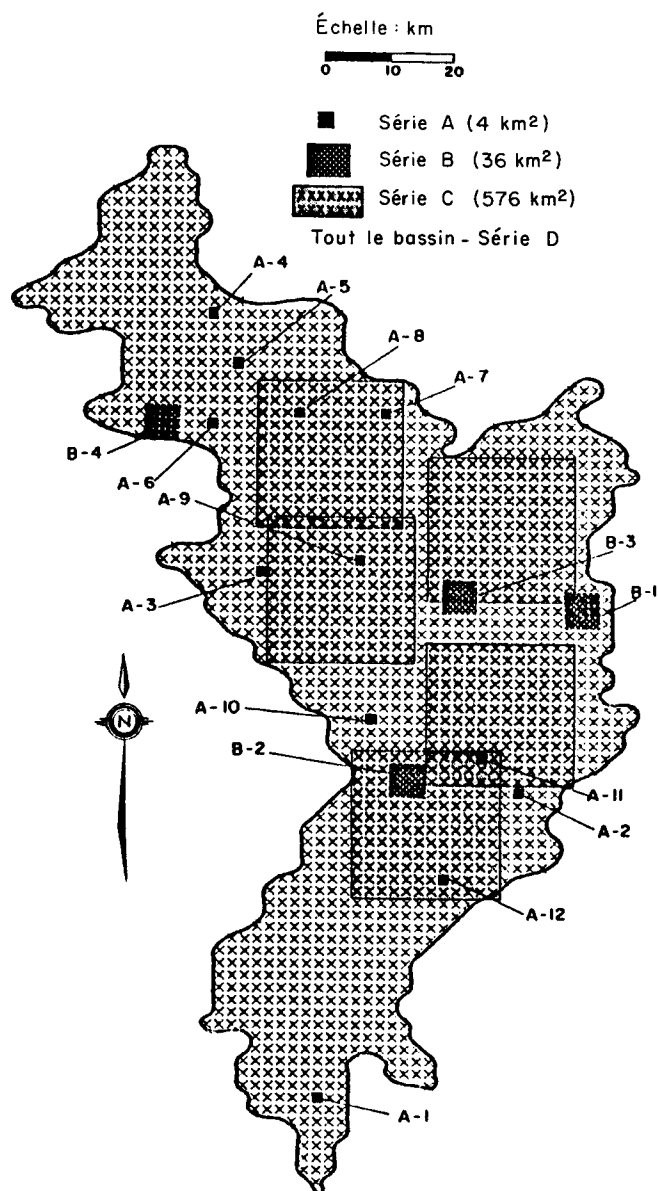


FIG. 2. Bassin de la rivière Chaudière, carte de localisation des séries de superficies analysées.

récemment Kilinc et Richardson (1973) ont abordé le problème du détachement des particules solides à partir des caractéristiques hydrauliques de ruissellement. Depuis, des efforts ont été orientés non seulement sur l'estimation potentielle de l'érosion ou des apports solides aux cours d'eau mais aussi sur la cartographie des aires d'érosion. L'ordinateur a ainsi joué tout récemment un rôle important dans la description de l'érosion et du transport solide. Citons en exemple le modèle ANSWERS (Beasley *et al.* 1980), CREAMS (Knisel 1980) et GAMES (Dickinson et Pall 1983). Bien que de tels modèles peuvent être appliqués à une grande variété de conditions, ils ne permettent pas de cartographier les sources d'érosion sur de grandes étendues de bassin, et de plus, ils sont adaptés à des conditions régionales ne prenant pas en compte les effets climatiques saisonniers: pluie, neige, gel, dégel, etc.

Le modèle LAVSED-I vise à développer une approche simple en vue de prédire l'érosion des bassins et l'apport solide dans les cours d'eau nordiques, particulièrement les grands

bassins, compte tenu des effets climatiques nordiques tels qu'observés dans le Québec septentrional.

LAVSED-I requiert une grande quantité de données descriptives au niveau des bassins ou des cours d'eau (actuelles ou hypothétiques) tels: (1) pluviométrie: intensité et lame d'eau de ruissellement (pluie, neige); (2) physiographie du territoire; (3) type de sol; (4) couverture végétale (arborescente, herbacée); (5) utilisation du territoire (secteurs boisés, agricoles, urbains); (6) description individuelle du grillage de base; (7) information générale.

Le modèle utilise le concept de subdivision des bassins sous forme d'une grille élémentaire, carrée, de dimension variable dont les maillons sont indépendants sur le plan hydrologique et sédimentologique. Chaque élément est cependant assujéti aux conditions hydro-pluviométriques et autres tel que cités ci-dessus. Au niveau du transfert le concept change puisque à la fois la dimension du quadrillage et la dimension du bassin interviennent dans les coefficients de transfert (voir fig. 2).

### Équation universelle de perte de sol

Cette formule propose une quantification de l'érosion en nappe sur une parcelle de terre de dimension standard, faisant un hectare de superficie (pente normale 9%), basée exclusivement sur les pluies, comme agent érosif. Elle prend la forme suivante:

$$[1] \quad E = \alpha R K L S C P$$

où  $E$  = perte de sol (kt/km<sup>2</sup>),  $R$  = agressivité des pluies,  $K$  = érosivité du sol,  $L$  = facteur lié à la longueur de la parcelle,  $S$  = facteur lié à la pente de la parcelle,  $C$  = facteur lié au couvert végétal,  $P$  = facteur lié aux pratiques agricoles ou pratiques anti-érosives et  $\alpha$  = coefficient de transformation d'unités (t/acre vs. kt/km<sup>2</sup>), égal à 0,247.

Le facteur moyen d'agressivité des pluies  $R$  s'obtient pour une région donnée au moyen d'un abaque établi par Wischmeier et Smith (1965), basé sur les statistiques de précipitation. L'équation équivalente est

$$[2] \quad R \approx 25 + 0,75(h_{1/2} \times h_{24/2} \times h_m)$$

où  $h_{1/2}$  = hauteur de pluie horaire ayant une période de retour de 2 ans (en pouces),  $h_{24/2}$  = hauteur de pluie journalière ayant une période de retour de 2 ans (en pouces) et  $h_m$  = précipitation totale annuelle moyenne (en pouces).

Ces données apparaissent sous forme graphique dans la figure 1. Le pourcentage des chutes de neige annuelles correspond à 25% de la précipitation totale.

Le facteur d'érosivité des sols  $K$  est évalué à l'aide d'un abaque établi par Wischmeier *et al.* (1971) à partir de la granulométrie, du pourcentage de la matière organique, de la structure et de la perméabilité du sol érodé.

Le facteur lié à la longueur de la parcelle  $L$  est moins sensible dans le calcul de l'érosion et s'obtient par la relation suivante:

$$[3] \quad L = \sqrt{l_o}$$

Où  $l_o$  est la longueur de la parcelle en pieds.

Le facteur lié à la pente de la parcelle  $S$  tient compte de l'accroissement du potentiel érosif des pluies et du ruissellement rattaché à une accentuation de pente. L'équation proposée par Smith et Wischmeier (1957) s'écrit

$$[4] \quad S = 0,00076s^2 + 0,0053s + 0,0076$$

où  $s$  est la pente de la parcelle en pour-cent tel que montré à la figure 3.

Le facteur de couvert végétal  $C$  représente le degré de protection contre l'érosion des sols assuré par la végétation herbacée, arbustive et arborescente pour laquelle le facteur  $C$  se rapproche de 0. À l'opposé, un sol dénudé constitue l'état le plus vulnérable à l'érosion et le facteur  $C$  devient alors égal à 1. Le facteur de pratique agricole  $P$  diffère du facteur  $C$  en tenant compte d'effets additionnels de pratique agricole et de mesures de conservation des sols.

Les résultats que l'on obtient par l'application de l'équation universelle ne reflètent pas le processus d'érosion dû au ruissellement proprement dit. Il est à noter toutefois qu'une amélioration très sensible a été proposée par Williams et Berndt (1976) remplaçant le facteur  $R$  par un facteur d'écoulement égal à la puissance 0,56 du produit du volume écoulé par le débit de pointe.

### Équation de Kilinc et Richardson

L'équation de régression obtenue par Kilinc et Richardson

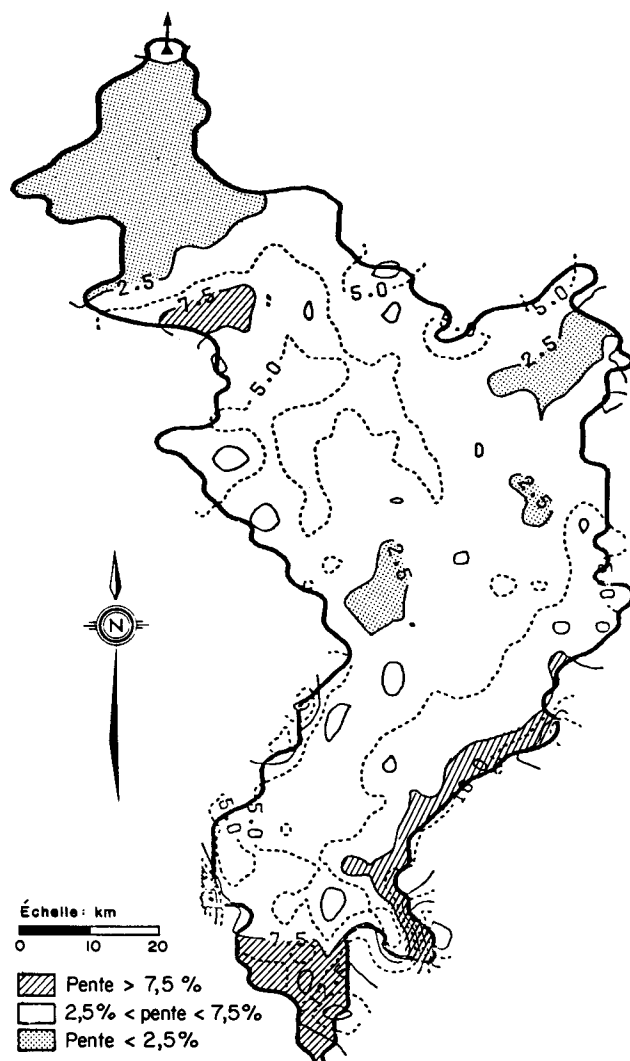


FIG. 3. Bassin de la rivière Chaudière, carte de la pente moyenne du terrain en pourcentage.

(1973) relie l'érosion d'une parcelle soumise à des pluies simulées aux caractéristiques hydrauliques du ruissellement. L'impossibilité d'obtenir une solution analytique aux problèmes d'érosion et de ruissellement sur des parcelles soumises à des pluies oblige le chercheur à recourir aux méthodes expérimentales pour déterminer la valeur des coefficients.

Généralement, les modèles de débit solide basés sur le concept de force tractrice prennent la forme suivante:

$$[5] \quad q_s = K_n(\tau_o - \tau_c)^n$$

Et les modèles basés sur la puissance d'érosion s'écrivent:

$$[6] \quad q_s = K_m[(\tau_o - \tau_c)\bar{u}]^m$$

où  $q_s$  = débit solide par unité de largeur,  $K_n$  et  $K_m$  = constantes représentant les propriétés physiques et la rugosité des sols,  $n$  et  $m$  = coefficients déterminés expérimentalement,  $\bar{u}$  = vitesse locale moyenne,  $\tau_c$  = contrainte critique de cisaillement et  $\tau_o$  = force tractrice.

La détermination expérimentale des coefficients a été effectuée pour des sols sableux soumis à des pluies simulées d'intensité variant de 1,25 à 4,5 po/h (32 à 114 mm/h) ruissellant sur de courtes pentes. L'analyse des variables par régression multiple a permis à Kilinc et Richardson d'obtenir plusieurs

équations dont les principales sont

$$[7] \quad q_s = e^{0,744} [(\tau_0 - \tau_c) \bar{u}]^{1,5836}$$

$$[8] \quad q_s = e^{-9,181} \bar{u}^{3,284} S^{0,4276}$$

$$[9] \quad q_s = e^{-11,645} Re^{2,054} S^{1,46}$$

Les unités étant  $q_s$ , lb/(s·pi) (la largeur en pied);  $\tau$ , lb/pi<sup>2</sup>;  $\bar{u}$ , pi/s;  $S$ , pi/pi;  $e$ , base naturelle des logarithmes; et  $Re$ , nombre de Reynolds.

Ces auteurs suggèrent l'utilisation de [9] comme première approximation de l'érosion du sol résultant du ruissellement d'une seule pluie. Leur jugement est basé sur le fait que les variables indépendantes peuvent être déterminées sans trop d'erreurs, et que l'équation est simple d'utilisation, rapide et, par conséquent, économique.

Bien que cette équation soit fondée sur les caractéristiques hydrauliques du ruissellement, elle ne tient ni compte du couvert végétal, ni du facteur de pratique agricole, et n'est valable que pour les sols sablonneux pour lesquels le facteur d'érosivité  $K$  est environ égal à 0,15.

Pour considérer l'influence des facteurs d'érosivité des sols, de la végétation et des pratiques agricoles, il nous a fallu modifier l'équation de Kilinc et Richardson de la façon suivante afin de pouvoir l'adapter au modèle de prédiction:

$$[10] \quad q_s = e^{-11,65} Re^{2,054} S^{1,46} \frac{K}{0,15} CP$$

où les paramètres  $K$ ,  $C$  et  $P$  correspondent aux facteurs introduits dans l'équation universelle.

### Modélisation mathématique

Le modèle considère un système hydro-sédimentologique basé sur l'utilisation d'une grille élémentaire à l'intérieur d'un bassin de grande dimension dont les entrées ont déjà été citées. Les sorties sont l'érosion brute, à l'échelle d'un maillon, l'érosion actuelle sur l'ensemble d'un bassin, l'érosion potentielle associée à l'utilisation du territoire et l'apport solide aux cours d'eau en sédiments fins. Un tel modèle regroupe ainsi l'essentiel des données de base généralement utilisées pour prédire le taux ou la susceptibilité à l'érosion et le transfert de la masse solide des bassins vers les cours d'eau.

L'emploi du modèle comporte quatre phases:

- l'analyse de l'ensemble des données physiques et climatiques d'un bassin à l'échelle des éléments du grillage;
- la caractérisation physique du système de grille et sa discrétisation (influence de la dimension de la grille);
- la simulation des mécanismes de transferts;
- la prédiction de l'érosion actuelle et potentielle au niveau d'un bassin et des apports solides dans les cours d'eau.

#### Analyse des données—bassin expérimental

Comme bassin expérimental nous avons choisi celui de la rivière Chaudière situé dans la partie sud-est de la province de Québec (Canada) en raison de la quantité et de la qualité des données disponibles: son bassin de drainage, montré à la figure 1, couvre une superficie de 6684 km<sup>2</sup> à l'embouchure entre les méridiens de longitude 70°15'O et 71°40'O et les parallèles 45°15'N et 46°45'N. Par rapport à la station d'observation à Saint-Lambert-de-Lévis le bassin présente une superficie de 5830 km<sup>2</sup>. La rivière Chaudière qui en consuit le principal cours d'eau, prend sa source dans la chaîne montagneuse des Appalaches à la frontière canado-américaine. Elle s'écoule vers le nord, traversant successivement les Appalaches puis la

TABLEAU 1. Calcul du facteur d'érosivité des sols pour les principaux profils pédologiques, bassin de la rivière Chaudière

Série	Type	% superficie	K
Beaurivage	Loam sableux	12,7	0,10
Kamouraska	Loam	9,5	0,15
Mawcook	Loam sablo-pierreux	16,5	0,17
Platon	Argile	2,2	0,15
Saint-André	Loam sablo-graveleux	11,8	0,20
Saint-Jude	Sable loameux	12,3	0,18
Saint-Nicolas	Loam sablo-schisteux	5,2	0,04
Saint-Samuel	Sable fin	6,6	0,15
	Tourbe grossière	3,8	0
	Marécages	7,0	0
	Affleurements rocheux	3,1	0
Arago	Loam pierreux	13,8	0,25
Beaurivage	Loam sablo-graveleux	1,8	0,10
Brompton	Loam argileux-pierreux	3,7	0,30
Le bras	Loam sableux	0,9	0,10
Chabot	Loam pierreux	1,1	0,10
Chapais	Loam pierreux	8,5	0,15
Dessaint	Loam pierreux	2,3	0,10
Fourchette	Loam sablo-graveleux	1,2	0,20
Garneau	Loam pierreux	11,9	0,10
Lafontaine	Loam argileux-pierreux	4,4	0,10
Leeds	Loam graveleux	15,6	0,15
Mont-Carmel	Loam pierreux	1,0	0,10
Neubois	Loam sableux	1,2	0,10
Painchaud	Loam pierreux	3,3	0,10
Rivière-du-Loup	Loam sablo-graveleux	2,4	0,20
Saint-Bruno	Loam sablo-graveleux	4,6	0,17
Sainte-Marie	Loam graveleux	11,9	0,10
Saint-Anésime	Loam pierreux	2,2	0,10
Total		91,8%	$\bar{K} = 0,155$

plaine du Saint-Laurent pour se déverser dans le fleuve à proximité de la ville de Québec.

Parmi les données disponibles sur ce bassin, on retrouve la topographie, la climatologie, l'hydrométrie, la sédimentologie, la pédologie, la foresterie et l'agriculture, de même que des observations sur la charge solide en suspension effectuées à Saint-Lambert-de-Lévis depuis 1968.

Les caractéristiques physiques du bassin de la rivière Chaudière (pente, couvert forestier, emploi des terres, etc.) introduites dans le modèle et analysées, sont présentées aux figures 4a-4d. On notera en particulier que la pente moyenne du terrain (fig. 3) varie entre 2,5% et 7,5% sur près de 90% du bassin, sauf aux limites périphériques amont où la pente excède parfois 7,5%. Les figures 4a et 4b montrent aussi l'importance de l'agriculture combinée à l'utilisation des sols par les boisés mixtes sur une grande proportion du territoire. Quant au type de sol, le tableau 1 indique un loam (argileux, sableux, graveleux ou pierreux) sur près de 75% du territoire.

#### Dimensionnement de la grille et intégration des données

L'érosion à la surface de petits bassins versant peut être obtenue facilement en découpant la superficie considérée en entités physiographiques homogènes, dont la superficie unitaire standard est d'un hectare, sur lesquelles on calcule l'érosion à partir d'une des deux équations précitées.

Une telle subdivision dans le cas de grand bassin tel celui de la rivière Chaudière aurait entraîné un découpage trop serré, soit près de 600 000 unités de calcul. Or, étant donné la difficulté de lier le prélèvement d'un très grand nombre de points

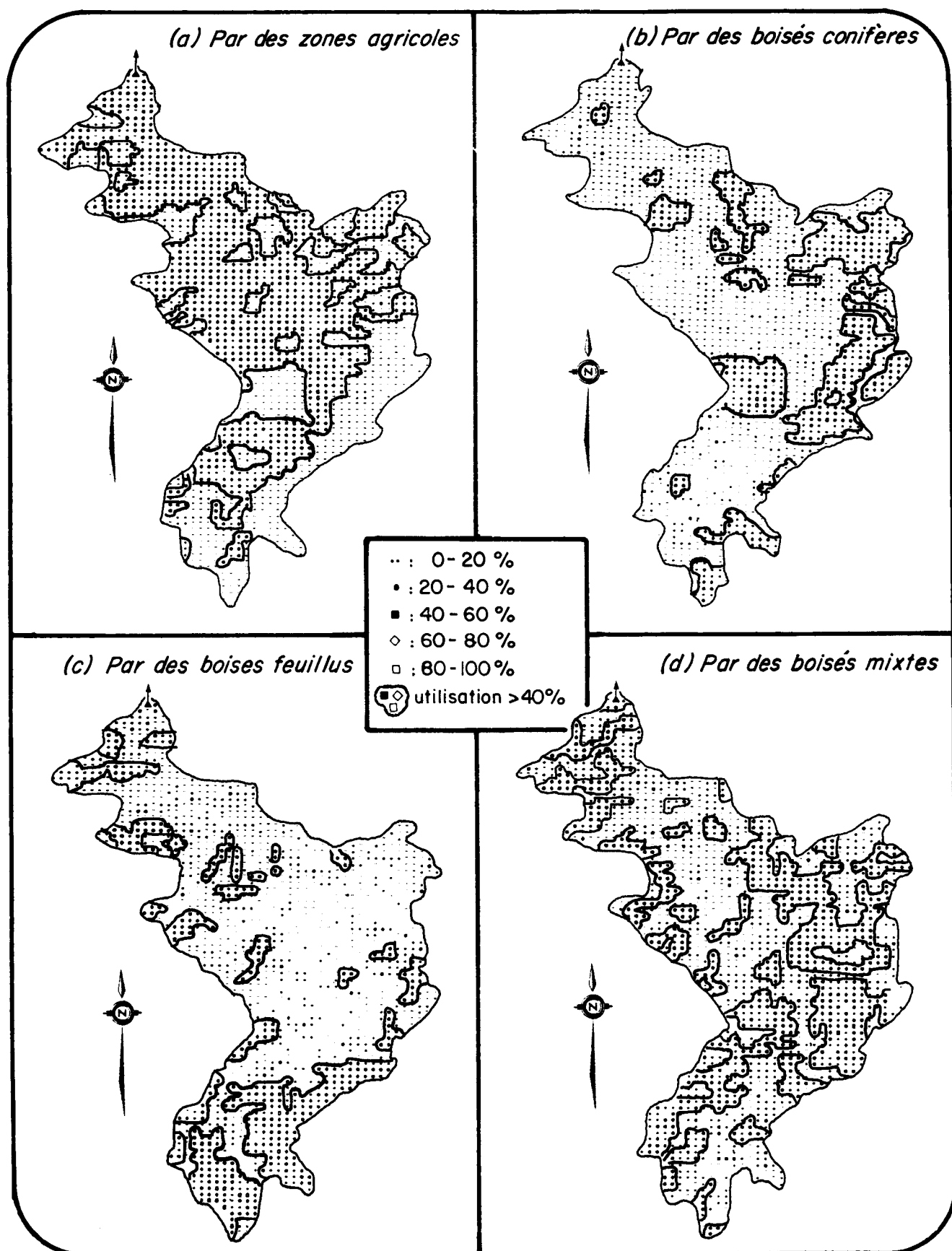


FIG. 4. Bassin de la rivière Chaudière, cartes du pourcentage d'utilisation du sol: (a) par des zones agricoles, (b) par des boisés conifères, (c) par des boisés feuillus, (d) par des boisés mixtes.

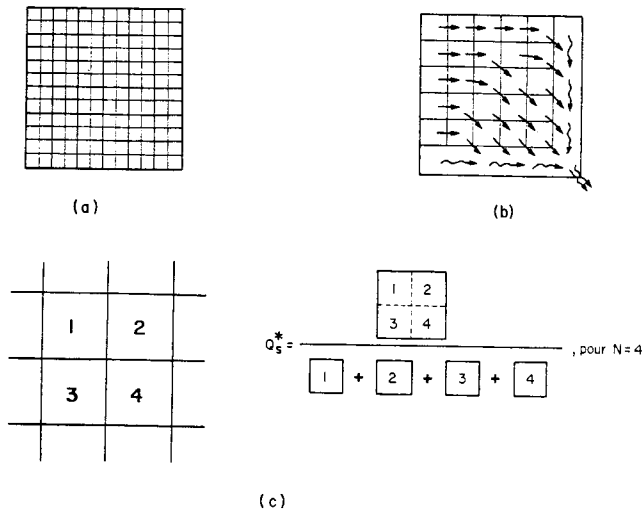


FIG. 5. (a) Schéma de regroupement des superficies de 144 éléments pour 36 sous-groupes de 4 éléments; (b) schéma d'érosion et de transport au niveau d'un grillage; (c) schéma du calcul du quotient d'érosion  $Q_s^*$ .

de calcul à la précision des données disponibles à cette échelle, une méthode différente a été envisagée. Cette méthode se divise en deux étapes. La première consiste à découper le bassin versant en éléments carrés de superficie supérieure à celle des parcelles unitaires standard, et à prédire l'érosion sur ces éléments de calcul. La seconde étape vise à déterminer l'influence de la dimension des éléments du quadrillage sur la prédiction d'érosion et à introduire un facteur de correction au processus de calcul, tenant compte de la dimension de la grille.

Dans un premier temps donc le bassin expérimental a été découpé en 1671 éléments de 4 km<sup>2</sup>, suivi dans un deuxième temps d'une subdivision partielle de la grille avec des maillons variant de 0,03 à 3000 km<sup>2</sup> (voir fig. 2, 5a-5c).

Cette approche peut être considérée comme faisant partie d'un ensemble que si l'information est reportée à chaque élément en supposant qu'une des deux équations ou les deux s'appliquent à l'élément. Dans la présente étude, les données ont été schématisées au moyen de l'ordinateur en faisant ressortir les aspects dominants intervenant au niveau de chaque maille.

#### Facteur de correction associé au système de grille

La discrétisation spatiale autorise l'utilisation systématique et indépendante des paramètres qui conditionnent l'érosion. Au départ nous avons proposé un découpage de l'espace en mailles carrées sur lesquelles ont été discrétisées les caractéristiques physiques du milieu. Or dans le calcul de l'érosion, la pente moyenne définie par Wischmeier et Smith (1965) et par Kilinc et Richardson (1973) et intervenant dans les équations de base est un des paramètres les plus significatifs se rattachant à l'érosion. Puisque le facteur pente est fonction de la longueur de l'élément, il est raisonnable de croire que la dimension et l'orientation du quadrillage influencent directement le calcul d'érosion, à plus forte raison lorsque la superficie des éléments est très grande par rapport à celle des parcelles expérimentales.

La pente d'un élément de calcul infinitésimal doit être considérée uniforme, tel que montré à la figure 6. Les élévations extrêmes sont alors situées sur la diagonale et non sur le côté de l'élément tel que prescrit dans le calcul du facteur de pente de l'équation universelle, exprimée par [4]:

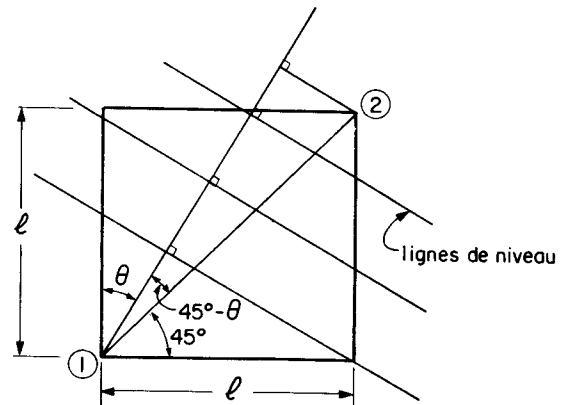


FIG. 6. Élément infinitésimal de calcul d'érosion.

$$[11] \quad S = 0,00076s^2 + 0,0053s + 0,0076$$

avec

$$[12] \quad s = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{l} \times 100$$

où  $s$  = pente d'un élément de la grille,  $E_{\max}$  = élévation maximale sur un élément de la grille et  $E_{\min}$  = élévation minimale sur un élément de la grille (longueur unitaire de la grille).

Or, eu égard à un élément infinitésimal (fig. 6) la pente s'écrit

$$[13] \quad s_i = \frac{100(E_{\max} - E_{\min})}{l(\cos \theta + \sin \theta)} = \frac{s}{\cos \theta + \sin \theta}$$

La modification entraînée dans le calcul d'érosion s'évalue pour un élément de calcul en connaissant la valeur de l'angle  $\theta$ . Sachant que l'intensité et l'orientation de la pente est équiprobable dans toutes les directions, pour un grand nombre d'éléments, les propriétés de symétrie de la variable  $\theta$  peuvent alors être numériquement évaluées en utilisant la règle de Simpson ce qui permet d'obtenir

$$[14] \quad S_i = (0,93 \times 0,00076s^2) + (0,79 \times 0,0053s) + 0,0076$$

où

$$[15] \quad S_i = S/k$$

où  $k$  est la constante de calcul pour un élément infinitésimal.

Pour la discrétisation du bassin versant quatre séries de mailles possédant une grande variation de pente et diverses caractéristiques physiques ont été choisies arbitrairement: série a: 12 mailles de 4 km<sup>2</sup> divisées en 144 unités de 0,028 km<sup>2</sup>; série b: 4 mailles de 36 km<sup>2</sup> divisées en 144 unités de 0,25 km<sup>2</sup>; série c: 5 mailles de 575 km<sup>2</sup> divisées en 144 unités de 4 km<sup>2</sup>; série d: la totalité du bassin subdivisé selon le grillage de base (4 km<sup>2</sup>).

À partir des données de ces quatre séries, l'analyse a porté sur l'évaluation de l'érosion sur une superficie quelconque  $A$ , selon les calculs effectués sur de plus petites superficies  $A_0$ ;  $A > A_0$ . Pour chacune des superficies des séries a, b et c, chaque élément couvrant 1/144 de la superficie a d'abord été considéré individuellement puis en groupe selon les arrangements suivants: 36 groupes de 4 éléments; 16 groupes de 9 éléments; 9 groupes de 16 éléments; 4 groupes de 36 éléments; 1 groupe de 144 éléments. En ce qui concerne la série d, les éléments de 4 km<sup>2</sup> ont été regroupés pour former des sous-groupes successifs de 4, 9, 16, ..., 1600 éléments.

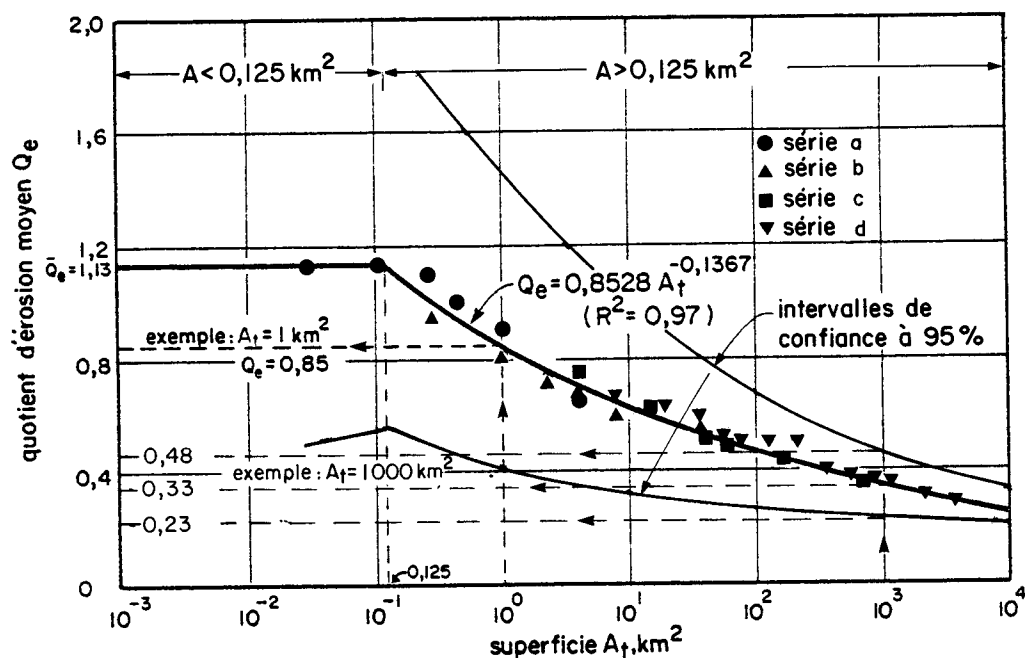


FIG. 7. Valeur moyenne du quotient d'érosion et intervalles de confiance (95%) en fonction de la superficie drainée.

La méthode consiste donc à analyser pour chacun des groupes un très grand nombre de valeurs et de définir un *quotient d'érosion*  $Q_e$ , exprimant le rapport de l'érosion calculée sur un ensemble à la sommation de l'érosion sur chacun des éléments formant cet ensemble, tel que schématisé à la figure 5c.

Étant donné le très grand nombre de points de calculs, la moyenne  $\bar{Q}_e$  et l'écart-type  $\sigma$  ont été relevés pour chacun des groupes et sous-groupes.

#### Valeur moyenne du quotient d'érosion

À partir des résultats obtenus pour chacune des séries individuelles exprimant la valeur moyenne du quotient  $\bar{Q}_e$  en fonction du nombre d'éléments par sous-groupe, il devient possible d'obtenir une expression reliant la valeur de  $\bar{Q}_e$  à la superficie des éléments. L'analyse par régression multiple donne (Julien 1979)

$$[16] \quad \bar{Q}_e = \text{Cte} = 1,13 \quad \text{pour } A < 0,125 \text{ km}^2$$

$$[17] \quad \bar{Q}_e = 0,85AA^{-0,137} \quad \text{pour } A > 1,25 \text{ km}^2 \quad (R^2 = 0,97)$$

où  $\bar{Q}_e$  = valeur moyenne du quotient d'érosion de chaque série individuelle d'éléments et  $A$  = superficie de chaque sous-groupe d'éléments ( $\text{km}^2$ ). La constante 1,13 a été obtenue en prenant la valeur moyenne de 1728 valeurs individuelles de la série a.

Ces deux dernières équations sont illustrées à la figure 7 et comparées aux valeurs moyennes obtenues de chacune des séries du groupe a, b, c ou d. L'excellent ajustement obtenu pour des superficies variant de 0,03 à 3000  $\text{km}^2$ , revêt une grande importance pratique. En effet, les résultats montrés à la figure 7 signifient qu'un calcul d'érosion à partir d'éléments de 1  $\text{km}^2$ , par exemple, représente en moyenne 85% de l'érosion calculée en découpant la superficie selon les parcelles expérimentales standard (1 ha). Il est intéressant de constater que pour une superficie inférieure à 0,125  $\text{km}^2$ , le calcul d'érosion peut être effectué sans modification majeure de l'équation universelle tandis que la valeur de  $\bar{Q}_e$  diminue avec l'accroissement de la superficie du grillage lorsque  $A > 0,125 \text{ km}^2$ .

#### Intervalles de confiance du quotient d'érosion

Une seconde analyse par régression multiple linéaire a été effectuée avec les valeurs de l'écart-type  $\sigma$  et l'équation finalement obtenue s'écrit sous la forme

$$[18] \quad \sigma = 0,00235 + \left( \frac{1 - A_0}{A} \right) (0,148 - 0,0226 \log_{10} A) \quad (R^2 = 0,71)$$

où  $\sigma$  = écart-type logarithmique du quotient d'érosion  $Q_e$  obtenu par régression;  $A$  = superficie des sous-groupes d'éléments ( $\text{km}^2$ );  $A_0$  = superficie des éléments de base ( $\text{km}^2$ ).

Cette équation est uniquement valable lorsque  $A \geq A_0$ . Les valeurs calculées ont été comparées aux valeurs obtenues par régression. Les fonctions de répartition du quotient d'érosion sont symétriques et obéissent à une loi de type log-normal (Julien 1979).

Si on considère maintenant les intervalles de confiance à 95% calculés à partir des équations de régression, lorsque  $A_0$  tend vers zéro, on obtient les deux courbes enveloppes ( $\bar{Q}_e \pm 1,96\sigma$ ) montrées à la figure 7 qui tendent asymptotiquement vers la valeur moyenne pour de grande superficie.

#### Établissement des cartes d'érosion

##### Selon l'équation universelle

Puisque l'équation universelle a d'abord été dérivée en système anglais et que les élévations relevées sur les cartes topographiques sont en pieds, nous avons effectué les calculs dans ce système puis transformé le résultat dans le système international (SI). L'équation transformée dans le cas du bassin de la rivière Chaudière est

$$[19] \quad E_i = \alpha R_c K_c L_c S C_i P$$

ou

$$[20] \quad E_i = 48,13(0,0076 + 0,0053s_i + 0,00076s_i^2) \times C_i$$

avec  $E_i$  = érosion moyenne annuelle sur l'élément  $i$  ( $\text{kt}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ );  $R_c = 75$  (selon les précipitations régionales de

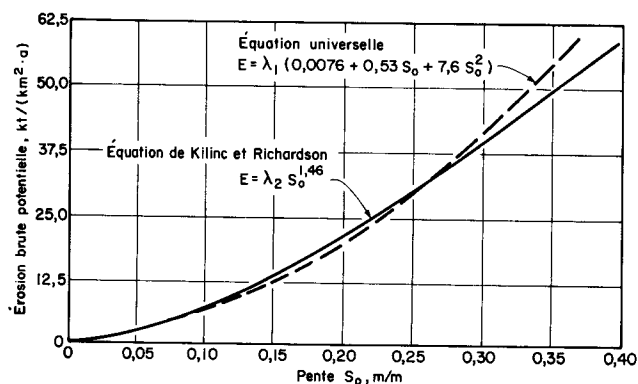


FIG. 8. Comparaison des deux équations fondamentales de calcul d'érosion.

la rivière Chaudière;  $K_c = 0,15$  (en moyenne), le tableau 1 fournit la valeur des sous-régions;  $L_c = \sqrt{300}$ ;  $S_i$  = facteur de pente ajusté d'un élément de calcul  $i$ ;  $s_i$  = pente effective de l'élément de calcul  $i$ ;  $C_i = (F_a + 0,01 \times F_b)$ , où  $F_a$  = fraction agricole et  $F_b$  = fraction boisée;  $P$  = facteur de pratique agricole ( $P = 1$ ).

#### Selon l'équation de Kilinc et Richardson

L'équation de Kilinc et Richardson a été obtenue pour un sol sableux dont le facteur d'érosivité  $K \approx 0,15$ . Or, ce facteur s'apparente à celui du bassin de la rivière Chaudière. L'équation est fondée sur les caractéristiques du ruissellement et ne tient pas compte de la couverture végétale ni du facteur de pratique agricole. Selon les auteurs, la pluie significative pour représenter l'érosion totale annuelle est celle d'une durée de 30 min avec une période de retour de 2 ans. En supposant cette intensité de pluie et en modifiant l'équation pour tenir compte des facteurs d'érosivité des sols, de végétation et de pratique agricole telle l'équation universelle, la relation suivante a été obtenue:

$$[21] \quad E_i = 32,3e^{-11,645} \text{Re}^{2,054} S_i^{1,46} \frac{K}{0,15} C_i P$$

ou

$$[22] \quad \text{Re} = \frac{ql_o}{v} = \frac{1,4 \times 300 \times 10^5}{12 \times 3600 \times 1,3} = 747,8$$

et après simplification,

$$[23] \quad E_i = 226,2 S_i^{1,46} C_i$$

où  $S_i$  = pente en m/m de l'élément  $i$  et  $C_i$  = facteur de couvert végétal de l'élément  $i$ .

#### Comparaison des deux approches

Pour un bassin donné les facteurs  $R$ ,  $K$ ,  $L$ ,  $C$  et  $P$ , apparaissant dans l'équation universelle ont leur équivalence dans l'équation de Kilinc et Richardson, si bien que c'est le facteur pente qui gouverne chacune des équations. En rendant les unités comparables ( $E \rightarrow \text{kt}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ) [20] et [23] peuvent facilement être comparées.

La comparaison des deux approches de calcul de l'érosion apparaît à la figure 8. Les courbes démontrent une nette ressemblance; il apparaît donc que l'une ou l'autre des équations peut être utilisée dans l'établissement des cartes d'érosion.

Les résultats simulés par chaque méthode sont présentés aux figures 9a et 9b. Ils sont très cohérents et les courbes diffèrent peu l'une de l'autre.

## Apports solides aux cours d'eau

### Coefficient de transfert

À partir de la discrétisation précédente le modèle d'érosion doit considérer deux facteurs en vue de déterminer l'apport solide dans les cours d'eau:

- (a) Un facteur de transformation de la parcelle élémentaire de 1 ha à la superficie des mailles de la grille découpant le bassin. Ce coefficient est connu et défini par le quotient d'érosion  $\bar{Q}_e$ .
- (b) Un coefficient de transfert associé aux pourcentages effectifs de sédiments érodés pouvant atteindre le cours d'eau lors d'une même averse (ou séquence d'averses) ou lors de la fonte printanière.

En effet, une grande quantité de matériaux érodés sur un bassin peut se déposer par la suite à l'intérieur du territoire sans atteindre le réseau hydrographique. Cette déposition diminue d'autant la quantité de solides susceptible d'être observée dans un cours d'eau. Le pourcentage d'érosion brute observé, sous forme de débit solide à une section quelconque d'un cours d'eau est représenté par un coefficient empirique d'apport solide ("sediment-delivery ratio"). Ce coefficient est relié de façon significative à la superficie même du bassin de drainage, à la pente du bassin, aux dépressions internes, à la densité de drainage, aux précipitations et à l'écoulement dans le cours d'eau. Les recherches à ce jour n'ont pas permis de structurer et de quantifier la relation complète entre tous ces facteurs mais certains sont particulièrement mis en évidence. Le plus important d'après Boyce (1975) est la superficie du bassin de drainage comme l'indique la figure 10.

En prenant en considération les coefficients de transfert, il devient alors possible de prédire la charge solide à une section quelconque d'un cours d'eau à partir de l'érosion brute des bassins versants. La relation obtenue se définit comme suit:

$$[24] \quad Q_{sp} = C_s \sum_{i=1}^N \frac{A_i E_i}{(\bar{Q}_e)_i}$$

où  $Q_{sp}$  = charge solide moyenne annuelle par les pluies en  $\text{kt}/\text{a}$ ;  $C_s$  = coefficient d'apport solide;  $A_i$  = superficie de l'élément de calcul  $i$  en  $\text{km}^2$ ;  $E_i$  = érosion brute annuelle en  $\text{kt}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  sur l'élément de calcul  $i$ ;  $N$  = nombre d'éléments de calcul sur le bassin;  $(\bar{Q}_e)_i$  = quotient d'érosion moyen de l'élément de calcul  $i$ .

Par comparaison, pour une superficie de  $5830 \text{ km}^2$ , la valeur moyenne du coefficient d'apport solide tirée de la figure 10 est environ égale à 0,03 (comprise entre 0,01 et 0,07), ce qui indique que seulement 3% en moyenne, de la quantité de solides érodés sur le bassin de la rivière Chaudière serait transportée jusqu'à Saint-Lambert-de-Lévis par le cours d'eau.

Les valeurs calculées par une des deux équations de base ([20] et [23]) qui sont présentées au tableau 2 sont pratiquement identiques, en dépit du très grand nombre de variables et d'hypothèses formulées. Par rapport aux valeurs mesurées, les résultats sont cependant variables et certes influencés par des effets climatiques nordiques (fonte de neige, effets de gels et de dégels, etc.).

### Influence des saisons

La station d'observation, en opération depuis 1968, à Saint-Lambert-de-Lévis, a permis d'évaluer le débit solide de la rivière Chaudière et également d'établir la relation entre le débit liquide et la concentration des sédiments en suspension. Un modèle de régression entre ces paramètres journaliers a été établi par Frenette *et al.* (1974) permettant de définir la charge sédimentaire moyenne durant la crue printanière à



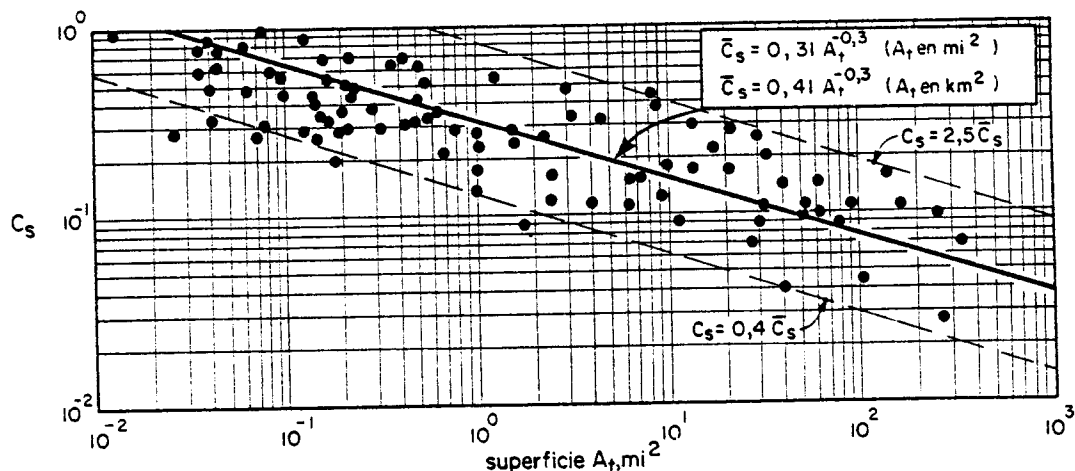


FIG. 9. Coefficient d'apport solide en fonction de la superficie drainée (d'après Boyce 1975).

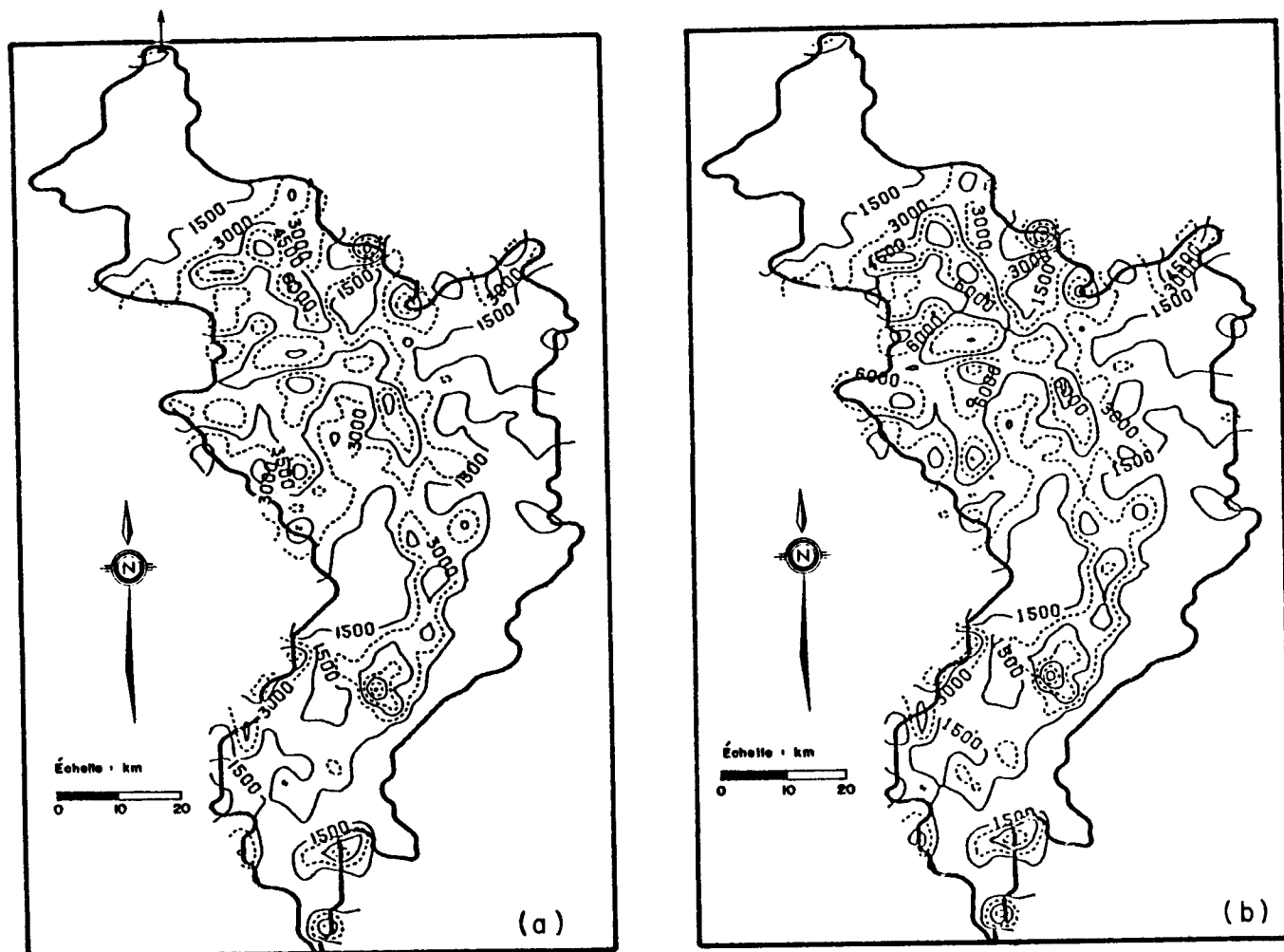


FIG. 10. Bassin de la rivière Chaudière—carte de l'érosion brute corrigée ( $\bar{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ) calculée par (a) l'équation de Kilinc et Richardson et (b) l'équation universelle.

273 kt (métrique)/a. Par contre, pour l'ensemble de l'année la valeur moyenne mensuelle est présentée à la figure 11.

Selon ce sédimentogramme mensuel, il appert que le régime sédimentologique est fortement influencé par les saisons, ce qui a conduit à regrouper les données selon les périodes suivantes: période pluviale: juin à novembre; période nivale:

décembre, janvier et février; période printanière: mars, avril et mai.

La comparaison des calculs, théoriques et observés en tenant compte des précipitations respectives à chaque saison, apparaît dans le tableau 3. Les résultats de ce tableau indiquent que le modèle mathématique représente assez fidèlement l'éro-

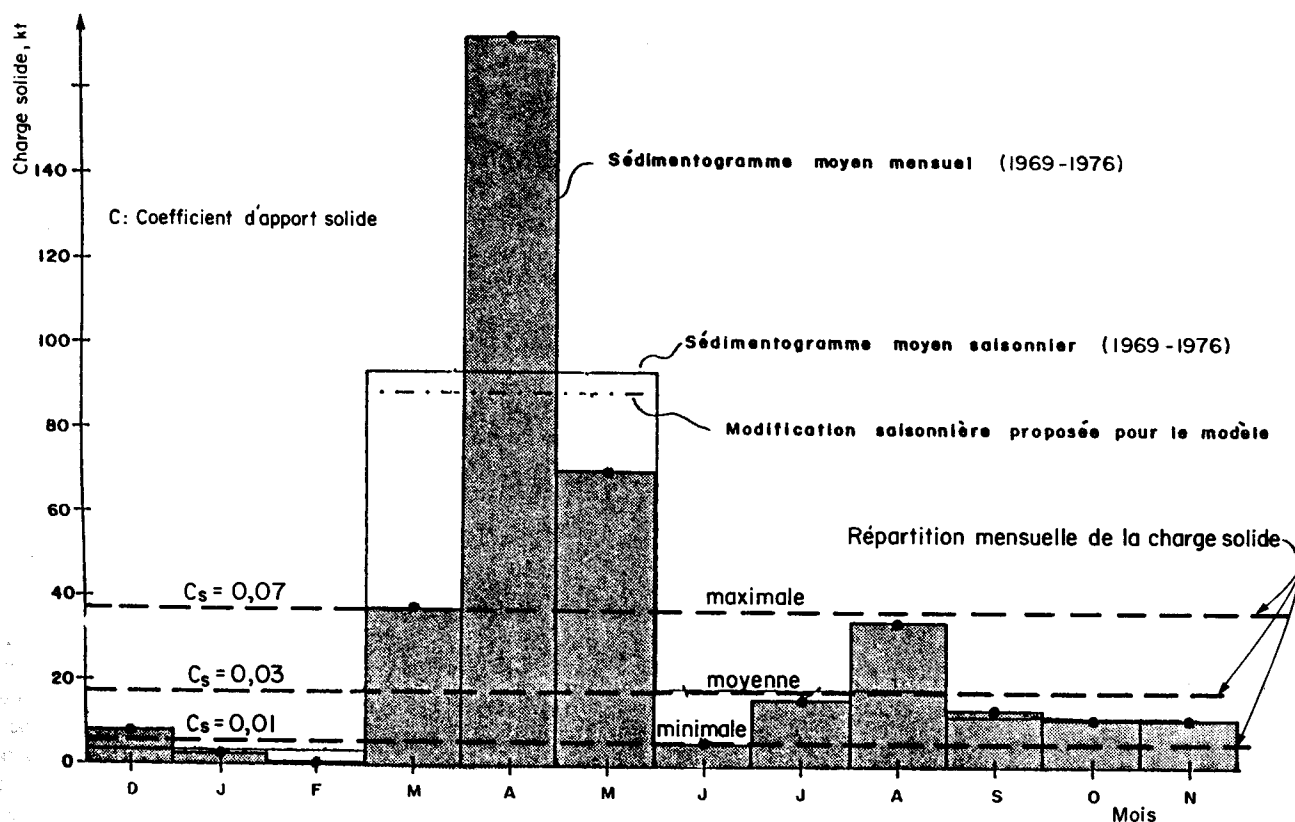


FIG. 11. Rivière Chaudière à St-Lambert-de-Lévis—sédimentogrammes moyen mensuel et saisonnier observés (1969-1976) et répartition mensuelle de la charge solide estimée.

TABLEAU 2. Bassin de la rivière Chaudière à Saint-Lambert-de-Lévis—comparaison de la charge solide moyenne annuelle théorique et observée

Équation de prédiction	Érosion brute sur tout le bassin (Mt/a)	Coefficient d'apport solide	Charge solide moyenne annuelle (kt/a)	Charge solide moyenne mensuelle (kt/a)
Équation universelle	6,44	0,01	64 (min.)	5,1
		0,03	193 (moy.)	16,1
		0,07	450 (max.)	37,5
Équation de Kilinc et Richardson	6,70	0,01	66 (min.)	5,1
		0,03	197 (moy.)	16,4
		0,07	460 (max.)	38,3
Valeurs observees:			364	

sion pluviale ayant lieu de juin à novembre pour une valeur moyenne de  $C_s = 0,03$ , mais sous-estiment les apports printaniers, même avec  $C_s = 0,07$ , et surestiment les apports d'hiver, même avec  $C_s = 0,01$ . Il apparaît ainsi que pour l'ensemble de l'année, la prédiction mathématique équivaut en moyenne ( $C_s = 0,03$ ) à environ 54% des apports solides totaux. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce résultat:

(a) En milieu nordique, le manteau nival et le phénomène de gel et de dégel ont pour effet d'augmenter la résistance des sols à l'érosion et, partant, de diminuer le facteur d'érosivité  $K$  ( $C_s$  = faible à très faible).

(b) Le phénomène de dégel entraîne le craquement, la fissuration, ou le soulèvement (par formation de lentille) des sols fins et (ou) le relâchement de contrainte intergranulaire, ce qui a pour effet de diminuer la résistance des sols à l'érosion et, partant, d'accroître le facteur d'érosivité  $K$ .

(c) À l'augmentation du facteur d'érosivité s'ajoutent l'effet du ruissellement accéléré associé à la fonte printanière et de la température de fonte ( $\pm 0^\circ\text{C}$ ) affectant directement la viscosité de l'eau, donc l'action érosive. Le coefficient d'apport solide devient alors plus élevé. Notons, par exemple, qu'aux États-Unis on a observé que le transport solide augmentait par un facteur de 2,5 lorsque la température de l'eau diminuait d'une vingtaine de degrés Fahrenheit ( $\pm 11^\circ\text{C}$ ).

Étant donné la bonne concordance des résultats en période pluviale (6 mois) avec un rapport de 0,82 entre les valeurs prédites et observées, il faut en déduire que les coefficients de transfert,  $\bar{Q}_e$  et  $C_s$  moyens ( $C_s \approx 0,03$ ), s'ajustent bien aux conditions estivales et automnales régies par les pluies. En saison froide, il va de soi que le coefficient d'érosivité et d'apport solide diminue, même en-dessous de la cote  $C_s \approx 0,01$ , tandis qu'au printemps, au contraire, la valeur de

TABLEAU 3. Charge solide saisonnière de la rivière Chaudière

Période	Tonnage théorique selon l'équation universelle $Q_s^*$ (kt)	Tonnage observé $Q_s$ (kt)	$Q_s/Q_s^*$
Moyenne annuelle (1968-1976)	197 ( $C_s = 0,03$ ) 462 ( $C_s = 0,07$ )	364	1,85 0,78
Saison pluviale (juin-novembre)	98,5 ( $C_s = 0,03$ )*	81*	0,82*
Saison nivale (décembre-février)	49,2 ( $C_s = 0,03$ ) 16,4 ( $C_s = 0,01$ )*	10	0,20 0,63*
Saison printanière (mars-mai)	49,2 ( $C_s \approx 0,03$ ) 114,8 ( $C_s \approx 0,07$ ) 278 ( $C_s = 0,17$ )*	273	5,55 2,40 0,99*

\* Valeur représentative.

$C_s$  dépasse largement la limite moyenne maximale de 0,07 ( $C_s = 0,17$ ). Ce double phénomène de dépassement des limites usuelles, inférieures et supérieures, est aussi associé au phénomène d'accumulation de la neige en hiver, qui constitue un indice d'érosion en puissance dont les effets ne se font sentir qu'au printemps. Il y a donc là un transfert saisonnier entre les causes de l'érosion et les effets observés.

L'état actuel de la recherche ne permet pas cependant de discerner laquelle des hypothèses citées plus haut explique le mieux l'accroissement printanier. De toutes les façons cependant, le phénomène se rattache aux conditions nordiques et à prime abord a un effet combiné des trois hypothèses. Cela permet d'expliquer d'après les observations que, règle générale, plus de 70% de la charge solide dans les cours d'eau nordiques survient durant la crue printanière.

Afin de tenir compte de ce phénomène et d'apporter une amélioration sensible du modèle, il convient d'introduire un coefficient d'ajustement associé aux effets saisonniers. Ce facteur de correction moyen annuel peut être obtenu facilement en calculant la moyenne des coefficients saisonniers par rapport à la valeur moyenne du coefficient ( $C_s = 0,03$ ), soit dans le cas de la rivière Chaudière.

$$[25] \quad \bar{c} = \frac{0,20 + (2 \times 0,82) + 5,6}{4} = 1,85$$

Cela démontre, toute proportion gardée, une plus grande sensibilité à l'érosion des bassins nordiques situés en milieu agricole par rapport aux bassins localisés en milieu plus tempéré. Le taux d'apport solide est alors deux fois supérieur à la normale. Rappelons, comme le montre la figure 4a, que le bassin de la rivière Chaudière est essentiellement agricole (près de 70% du territoire) alors que le reste du bassin est caractérisé par la forêt. L'hypothèse d'une érosion pelliculaire dominante est alors bien confirmée par le modèle.

#### Impact de l'utilisation du territoire sur le processus d'érosion

A priori, l'érosion des sols en valeur absolue est difficile à estimer, mais en terme relatif l'impact de l'utilisation du territoire sur le processus d'érosion est facile à prédire. Il s'agit en effet de rechercher un taux d'évolution en valeur relative en utilisant une des formules d'érosion. Par exemple, pour l'équation universelle, le taux d'évolution peut s'écrire

$$[26] \quad \lambda = \frac{K'}{K} \cdot \frac{L'}{L} \cdot \frac{S'}{S} \cdot \frac{C'}{C} \cdot \frac{P'}{P}$$

où  $K, L, S, C$  et  $P$  sont les facteurs tels que définis par l'USLE et  $K', L', S', C'$  et  $P'$  sont les facteurs prévisibles après modification du bassin.

Il suffit alors d'introduire dans le modèle les nouvelles valeurs primées au lieu des valeurs d'érosion brute pour obtenir les effets des travaux planifiés au niveau d'un bassin.

#### Conclusions

Le problème posé par l'érosion hydrique des sols est complexe et, dans l'état actuel des choses, la détermination quantitative de la susceptibilité à l'érosion est possible seulement par une modélisation mathématique.

Cette approche met l'accent sur l'importance primordiale des certains facteurs qui dominent l'érosion, à savoir: la pluviométrie ou les caractéristiques de ruissellement printanier, la pente, la couverture végétale, la superficie des bassins, la discrétisation des bassins, l'importance des coefficients de transfert, etc.

En admettant des hypothèses vraisemblables, le modèle LAVSED-I considère que l'érosion en nappe constitue la majeure partie de l'érosion. En sélectionnant deux types d'équations de pente de sol (équations universelle et de Kilinc et Richardson), modifiées et adaptées aux caractéristiques du modèle il a été possible d'obtenir des résultats significatifs en regard de la charge sédimentaire transportée par la rivière Chaudière, tributaire du Saint-Laurent. Les résultats démontrent en particulier l'influence du gel et dégel, et, de la présence de la neige au sol en milieu nordique.

Au niveau de la gestion d'un bassin, il importe par ailleurs d'apprécier l'impact des travaux sur le territoire (ex.: influence du déboisement ou mise en valeur agricole). À cet égard, avec la modélisation proposée, il est possible d'effectuer deux types de calculs: détermination de l'érosion actuelle et potentielle, c'est-à-dire avant et après exploitation (ou aménagement proposé) et distinguer ainsi les zones les plus susceptibles à l'érosion.

L'application de la simulation démontre comment il convient d'être prudent dans la prédiction du taux d'érosion. Par contre, le modèle conduit à conclure qu'il est possible d'utiliser une des deux équations de base, même en milieu nordique, moyennant certains coefficients d'ajustement, pour prédire le taux d'érosion et l'apport solide dans les cours d'eau en milieu nordique.

- BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F. et MONKE, E. J. 1980. ANSWERS. A model for watershed planning. Transactions of the ASAE, pp. 938-944.
- BOYCE, R. 1975. Sediment routing with sediment-delivery ratios. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources, United States, Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-S-40.
- DICKINSON, T. et PALL, P. 1982. GAMES: identification and control of soil erosion and fluvial sedimentation agricultural areas of the Canadian Great Lakes basin. Rapport soumis à Approvisionnement et Services série OS081-00223.
- EINSTEIN, H. A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. United States, Department of Agriculture, Technical Bulletin, n° 1026.
- FRENETTE, M., LLAMAS, J. et LARINIER, M. 1974. Modèle de simulation du transport solide en suspension des rivières Châteauguay et Chaudière. Rapport du Centre de Recherches sur l'Eau, Université Laval, Québec (Qué.)

- JULIEN, P. 1979. Érosion de bassin et apport solide en suspension dans les cours d'eau nordiques. Thèse de maîtrise, Département de génie civil, Université Laval, Québec (Qué.), 186 p.
- KILINC, M. et RICHARDSON, E. V. 1973. Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. Colorado State University (Fort Collins), Hydrology Papers, n° 63.
- KNISEL, G. W. 1980. CREAMS. A field scale model for chemicals runoff and erosion from agriculture land management system. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration, rapport n° 20.
- LI, R. M. 1972. Sheet flow under simulated rainfall. Thèse de maîtrise, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- MEYER, L. D. 1971. Soil erosion by water on upland areas. Dans *River mechanics*. Edité par H. W. Shen. Publié par H. W. Shen, Fort Collins, CO.
- PIEST, R. F. et MILLER, C. R. 1977. Sediment sources and sediment yields. Dans *Sedimentation engineering*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, Chap. IV, n° 54.
- SMITH, D. A. et WISCHMEIER, W. H. 1957. Factors affecting sheet and rill erosion. Transactions American Geophysical Union, 38(6).
- WILLIAMS, J. R. et BERNDT, H. D. 1976. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of the ASAE, 20(6).
- WISCHMEIER, W. H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. Soil Society of America Proceedings, 23(3).
- 1973. Upslope erosion analysis. Dans *Environmental impact on rivers*. Edité par H. W. Shen. Publié par H. W. Shen, Fort Collins, CO.
- WISCHMEIER, W. H. et SMITH, D. D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. United States, Department of Agriculture, Agriculture Handbook, n° 282.
- WISCHMEIER, W. H., JOHNSON, C. B. et CROSS, B. V. 1971. A soil erodibility monograph for farm land and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, 26(5).

#### Liste des symboles

$\alpha$	coefficient de transformation d'unités (t/acre vs. kt/km <sup>2</sup> ) = 0,247	$C_s$	coefficient d'apport solide
$\tau$	lb/pi <sup>2</sup>	$E$	perte de sol (kt/km <sup>2</sup> )
$\tau_c$	contrainte critique de cisaillement	$E_i$	érosion brute annuelle en kt/(km <sup>2</sup> · a) sur l'élément de calcul $i$
$\tau_o$	force tractrice	$E_{max}$	élévation maximale sur un élément de la grille
$A$	superficie de chaque sous-groupe d'éléments (km <sup>2</sup> )	$E_{min}$	élévation minimale sur un élément de la grille
$A_i$	superficie de l'élément de calcul $i$ (km <sup>2</sup> )	$e$	base naturelle des logarithmes
$A_o$	superficie des éléments de base (km <sup>2</sup> )	$F_a$	fraction agricole
$C$	facteur lié au couvert végétal	$F_b$	fraction boisée
$C_i$	facteur de couvert végétal de l'élément $i$	$h_{1/2}$	hauteur de pluie horaire ayant une période de retour de 2 ans (po)
		$h_{24/2}$	hauteur de pluie journalière ayant une période de retour de 2 ans (po)
		$h_m$	précipitation totale annuelle moyenne (po)
		$K$	érosivité du sol
		$K_c$	érosivité moyenne des sols du bassin de la rivière Chaudière
		$K_n, K_m$	constantes représentant les propriétés physiques et la rugosité des sols
		$k$	constante de calcul pour un élément infinitésimal
		$L$	facteur lié à longueur de la parcelle
		$L_c$	longueur normale d'une parcelle standard
		$l$	longueur unitaire de la grille
		$l_o$	longueur de la parcelle en pieds
		$N$	nombre d'éléments de calcul sur le bassin
		$n, m$	coefficients déterminés expérimentalement
		$P$	facteur lié aux pratiques agricoles ou pratiques anti-érosives
		$\bar{Q}_e$	valeur moyenne du quotient d'érosion de chaque série individuelle d'éléments
		$(\bar{Q}_e)_i$	quotient d'érosion moyen de l'élément de calcul $i$
		$Q_{sp}$	charge solide moyenne annuelle par les pluies (kt/a)
		$q_s$	débit solide par unité de largeur
		$R$	agressivité des pluies
		$R_c$	facteur d'agressivité des pluies du bassin de la rivière Chaudière
		$Re$	nombre de Reynolds
		$S$	facteur lié à la pente de la parcelle
		$S_i$	facteur de pente ajusté d'un élément de calcul $i$
		$s$	pente de la parcelle (%)
		$s_i$	pente effective de l'élément de calcul $i$
		$\bar{u}$	vitesse locale moyenne