
Optimisation des paramètres Green et Ampt pour un modèle conceptuel pluie–infiltration–ruissellement

R. Chérif¹, J.-L. Robert¹ et R. Lagacé²

¹Département de génie civil et ²Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec, Québec, Canada G1K 7P4

Chérif, R., Robert, J.-L. et Lagacé, R. 2004. **Optimisation des paramètres Green et Ampt pour un modèle conceptuel pluie–infiltration–ruissellement.** Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada **46**: 1.7-1.14. Les modélisations du ruissellement de surface et de l'infiltration sont généralement faites séparément. Un modèle conceptuel global (à deux réservoirs) de simulation des ruissellements de surface couplé au modèle d'infiltration Green et Ampt (1911) a été développé. Dix-neuf expériences ont été réalisées en laboratoire pour différentes intensités de précipitation et différents états d'humidité initiale du sol. Les mesures expérimentales ont été ajustées par le modèle de l'infiltration Green et Ampt (1911). Les valeurs des paramètres sont trouvées avec de larges erreurs. Ces expériences ont été utilisées, par la suite, pour l'optimisation des paramètres du modèle pluie-infiltration-ruissellement (PIR). La méthode du Simplex (Nelder et Mead 1965) a été utilisée pour le calibrage de ce modèle à partir des données expérimentales et des données synthétisées. Ces données synthétisées ont été générées pour neuf cas différents. Toutefois, la méthode du Simplex appliquée pour l'optimisation des paramètres du modèle PIR a divergé avec les deux types de données. Cette divergence est due à l'allure de la fonction objective et les interactions entre les paramètres du modèle. La valeur moyenne du rapport K/K_s , (K la conductivité hydraulique du sol et K_s sa conductivité hydraulique à saturation) est trouvée égale à 0,62 qui est une valeur comparable à la valeur théorique trouvée ultérieurement par Bouwer (1969). **Mots-clés:** infiltration, optimisation, fonction objective, paramètres, modèle conceptuel, calibrage synthétique, conductivité hydraulique.

Subsurface runoff and infiltration are generally modeled separately. A conceptual global model (of two reservoirs) simulating surface runoff coupled with the Green and Ampt (1911) equation was developed. Nineteen experiments were carried out in the laboratory for different rain intensities and different initial soil moistures. The experimental measurements were fitted to the Green and Ampt infiltration model. Data from these experiments were used for optimization of the rainfall-infiltration-runoff (PIR) model parameters. A synthetic calibration of the model was also realized for nine different cases. The application of the Simplex method (Nelder and Mead 1965) for model parameter optimization diverged with both measured and synthesized data. This divergence was due to the objective function's complex shape and the interactions between model parameters. K/K_s (where K is the hydraulic conductivity of the soil and K_s the hydraulic conductivity of the soil at saturation) was found equal to 0,62 which is close to the value found by Bouwer (1969).

INTRODUCTION

L'environnement continental est constitué de composantes principales (l'air, le sol, la végétation et l'eau) qui sont en

interactions complexes et continues entre elles. Parmi ces interactions, il y a les relations entre les précipitations, l'infiltration et l'écoulement de surface (Singh 1995). L'écoulement de surface est mesuré par les débits dont la connaissance est intéressante pour la prévision des crues, la protection contre les inondations, la conception des ouvrages hydrauliques, etc. De même, le phénomène de l'infiltration s'avère d'intérêt dans différents domaines comme l'agriculture, l'environnement et l'hydrogéologie. L'infiltration et les débits de ruissellement sont interdépendants et déterminés par les précipitations et l'état du sol (Musy et Soutter, 1991). Toutefois, la modélisation de ces deux processus (infiltration et écoulement superficiel) est généralement faite séparément en utilisant différents types de modèles mathématiques.

Les modèles mathématiques utilisés pour la modélisation de ces processus sont statistiques ou déterministes. Les modèles statistiques font ressortir des relations entre les données (physiographiques et météorologiques) et les réponses du système (bassin versant) en introduisant des composantes aléatoires. Quant aux modèles déterministes, ils traitent les processus hydrologiques dans le sens physique et peuvent être empiriques ou conceptuels (Bâ 1994). Les modèles empiriques utilisent des relations internes du système, identifiées par des équations mathématiques. Parmi ceux-ci, il y a les modèles d'infiltration (Horton 1938; Holtan 1961; Green et Ampt 1911; Kostikov 1932). Les modèles conceptuels font beaucoup moins appel à l'empirisme: ils identifient les relations internes du système et peuvent être globaux ou discrétisés. Un modèle conceptuel discrétisé subdivise le système en éléments tandis qu'un modèle conceptuel global traite le système comme une seule entité sans tenir compte des variations locales. Parmi ces modèles conceptuels, ceux qui utilisent la notion de réservoirs sont populaires en hydrologie de surface comme les modèles: CEQUEAU (Morin et al. 1995) et TANK (Sugawara et al. 1984). Ces derniers modèles estiment les capacités d'infiltration par des constantes ou des intensités, ce qui ne représente pas toujours la physique du phénomène. Le modèle d'infiltration de Green et Ampt (1911) est caractérisé par une base physique claire qui tient compte de la nature du sol (Rawls et Brakensiek 1983) et sa formule est indépendante du temps.

L'équation de Green et Ampt est encore utilisée dans plusieurs modèles hydrologiques récents pour l'estimation de l'infiltration au sol. Parmi ces modèles, nous citons le modèle de simulations hydrologiques HEC-HMS (Hydrologic

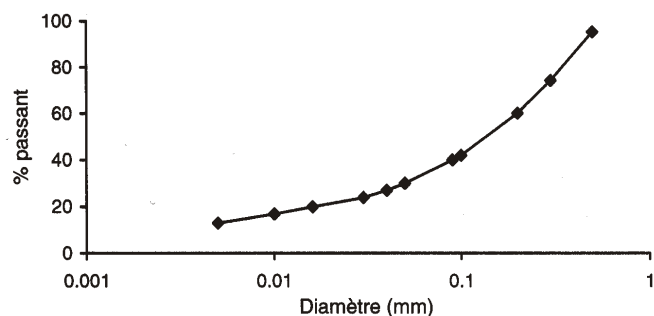


Fig. 1. Courbe d'analyse granulométrique du sol.

Engineering Center 2000), les modèles d'érosions des sols LISEM (Jetten 2002) et WEPP (USDA 1995). Pour l'utilisation de ces modèles, on peut déterminer la conductivité hydraulique à saturation à partir des propriétés physiques du sol et les recommandations aux utilisateurs insistent sur la nécessité, lorsque c'est possible, de procéder à un calibrage des paramètres du modèle de Green et Ampt.

Les auteurs du modèle HEC-HMS proposent quatre méthodes d'évaluation de l'infiltration, soit: taux initial et taux constant; déficit et taux constant; SCS Curve Number; Green et Ampt. Leurs remarques concernant ce dernier modèle font état de la possibilité d'estimer les paramètres à partir des caractéristiques du sol, mais considèrent comme un désavantage le fait qu'il est moins utilisé que d'autres méthodes et que, par conséquent, les professionnels de l'hydrologie bénéficient de moins d'expertise à son égard. Nous pensons que les résultats et l'approche d'optimisation des paramètres proposés ici viennent contribuer à combler cette lacune.

Dans le modèle LISEM, l'infiltration peut être calculée avec diverses équations, selon les données disponibles, parmi elles, celle de Green et Ampt. Cependant, l'auteur du modèle (Jetten 2002) recommande fortement de procéder à un étalonnage de façon à ajuster à la baisse la valeur du coefficient de conductivité hydraulique à saturation K_s . Notre démarche d'optimisation pourrait être utilisée dans le processus d'étalonnage d'un tel modèle.

Dans ce même contexte, pour l'ajustement des paramètres de Green et Ampt dans le modèle WEPP, Nicks et al. (2002) utilisent une procédure de calibrage, par essais-erreurs, basées sur les valeurs observées et calculées du ruissellement. Il sera donc d'intérêt de formuler cet ajustement en introduisant le principe de l'optimisation d'une fonction objective.

Les résultats du modèle dépendent de ses hypothèses, ses sollicitations et ses paramètres. Ces derniers peuvent être mesurés expérimentalement ou déterminés par calibrage. Le calibrage se base sur une technique d'optimisation automatique et une fonction objective qui est une comparaison entre les sorties observées et simulées du modèle (Yapo et al. 1998). Les techniques d'optimisation peuvent être analytiques ou directes. Les méthodes analytiques comme la méthode du gradient de Newton, la méthode de discrimination directionnelle et la méthode de régression nécessitent la connaissance de l'expression de la fonction objective et imposent certaines conditions restrictives (linéarité, continuité, etc.) (Bard 1974). La méthode du Simplex (Nelder et Mead 1965) est une méthode directe qui se base sur une figure géométrique et cherche

l'optimum dans toutes les directions de l'espace des paramètres. Elle ne pose pas de conditions restrictives sur la fonction objective et a été jugée efficace par plusieurs chercheurs (Johnston et Pilgrim 1976; Pickup 1977; Sorooshian et Dracup 1980). Il serait donc d'intérêt de coupler un modèle d'infiltration à un modèle conceptuel à réservoirs et d'estimer ses paramètres par la méthode du Simplex.

Les objectifs de ce travail seront donc: (1) le développement d'un modèle couplé; (2) la réalisation des expériences pour collecter des données utiles pour le calibrage du modèle et (3) le calibrage des paramètres physiques du modèle par la méthode du Simplex à partir des données expérimentales et de données synthétisées à partir de ce modèle.

MATÉRIELS et MÉTHODES

Dispositif expérimental

Le montage a été réalisé au laboratoire d'hydraulique de l'École de technologie supérieure de Montréal. Il est constitué d'un simulateur de pluie auquel a été associé un bassin versant expérimental. Le simulateur est formé d'un chariot et de buses. Son principe de fonctionnement est basé sur le déplacement du chariot dans un mouvement de va-et-vient au-dessus de la surface d'arrosage (Avendano 1998).

Le bassin versant Le bassin versant utilisé est un bac en plastique, il a une surface de (730 x 1120 mm) et une hauteur de 750 mm. Il a été trouvé au fond pour assurer la percolation de l'eau vers l'extérieur. Le sol utilisé est un sable moyen dont la courbe de granulométrie est présentée à la Fig. 1. Sa masse volumique apparente sèche est 1608 kg/m³. Sa conductivité hydraulique à saturation K_s a été mesurée au laboratoire à l'aide d'un perméamètre à charge constante. L'échantillon utilisé est une carotte cylindrique de 116,4 mm de hauteur et de 101,5 mm de diamètre. La formule du perméamètre à charge constante (Éq. 1) nous permet de calculer la valeur de la conductivité hydraulique à saturation du sol à partir des mesures du débit (Hillel 1983).

$$K_s = \frac{QL}{S_e \Delta H} \quad (1)$$

où:

K_s = conductivité hydraulique du sol à saturation [L/T],

Q = débit mesuré expérimentalement [L³/T],

L = hauteur de l'échantillon du sol [L],

S_e = section de l'échantillon du sol [L²] et

ΔH = perte de charge, caractéristique du perméamètre (égale à 570 mm dans notre cas) [L].

Pour un échantillon du sol, cinq mesures de débits ont été prises, ces mesures ont donné une valeur moyenne de conductivité hydraulique à saturation égale à 5×10^{-6} m/s soit 18 mm/h (Chérif 2003)

Le bac est rempli du sol selon la procédure suivante: un papier-filtre est introduit au fond du bac, ensuite une couche de gravier de 50 mm d'épaisseur est ajoutée pour assurer le drainage de l'eau. Ensuite, le sol est introduit dans le bassin en plusieurs couches compactées (90 coups par couche). Ce bac a été muni d'un drain de surface sur l'un de ses côtés pour collecter l'eau de ruissellement dans un seau.

Tableau 1. Différentes expériences réalisées.

Expérience	Intensité (mm/h)	Durée (min)	h_{ruist}^* (mm)	Teneur en eau initiale (%)
1	200	15	29,7	15,04
2	100	30	29,5	14,2
3	60	120	10	15,1
4	60	120	20,7	13,99
5	30	60	8,2	13,85
6	30	360	60,3	13,85
7	10	360	6,5	12,38
8	10	90	1,1	14,46
9	40	60	7	13,5
10	7,8	55	22,3	13,57
	156	10		
11	12,3	55	13,4	13,92
	20	20		
12	40	40	20,8	15,84
13	30	30	15,2	16,36
14	10	10	0,8	12,92
	15	15		
15	40	40	17,5	13,57
	15	15		
16	60	60	10,3	13,64
17	30	30	14,1	16,36
18	200	15	39,4	13,92
19	100	30	37,5	15,78

*mesurées à la fin de l'événement

Mesures expérimentales Nous avons réalisé différentes expériences dans lesquelles l'intensité de pluie, la durée de l'événement pluviométrique et l'humidité initiale du sol sont variées. Le Tableau 1 représente les caractéristiques de ces expériences. Pour chaque expérience, les valeurs de la teneur en eau du sol et le temps écoulé depuis le début de l'expérience sont mesurés simultanément. Un seau est installé à la sortie du drain du ruissellement et la quantité d'eau collectée est pesée pour des pas de temps successifs. Le récipient qui collecte l'eau de percolation est pesé pour quelques valeurs de temps écoulé depuis le début de l'expérience. La hauteur de la lame qui s'accumule en surface est mesurée à l'aide d'une règle plate introduite perpendiculairement à la surface du sol. Les mesures obtenues sont: les valeurs des teneurs en eau pour cinq profondeurs; les masses d'eau ruisselée cumulées (pour différents pas de temps); les masses d'eau de percolation; les valeurs de teneur en eau pour différents temps; la hauteur de la lame ruisselée dans certains cas. Il est à remarquer que nous avons réalisés une expérience par jour pour laisser le sol sécher pendant 24 heures. Pour les expériences auxquelles nous avons besoin que la couche du sol en surface soit bien sèche (faible humidité) nous avons utilisés des ventilateurs que nous laissons fonctionner durant 24 heures, de même au début de chaque nouvelle expérience nous mesurons les valeurs de la teneur en eau initiale, pour différentes profondeurs (Chérif 2003).

Conception du modèle pluie - infiltration - ruissellement (PIR)

Dans notre modèle (PIR) nous essayons de représenter la physique du phénomène d'infiltration. De fait, notre modèle est constitué de deux réservoirs:

- un réservoir de stockage en surface qui décrit le comportement de l'eau en surface;
- un réservoir qui représente le sol et décrit le comportement de l'eau dans le sol.

Au niveau du réservoir de stockage en surface, l'eau de pluie (h_{pl}) s'accumule sous forme de lame (h_s) jusqu'à ce que la rétention maximale de surface soit atteinte. Cette rétention est exprimée par la lame seuil c. à. d. hauteur maximale d'eau cumulée en surface (h_{sm}) à partir de laquelle le ruissellement superficiel commence. Le deuxième réservoir représente le sol. Au début de l'événement pluvial, il a une certaine teneur en eau exprimée par une hauteur d'eau initiale ($h_{ic}(1)$). Le sol absorbe l'eau infiltrée et l'emmagasine jusqu'à atteindre la saturation exprimée, dans notre modèle, par un niveau d'eau maximum (h_{icm}). Une fois ce niveau est atteint, le surplus d'eau dans le sol s'écoule par le fond du réservoir.

Le modèle Green et Ampt (1911) a une formule indépendante du temps et il a une base physique claire (Rawls et Brakensiek 1983). Pour cette raison, nous l'avons opté pour l'estimation de la capacité de l'infiltration dans notre modèle PIR. L'organigramme du modèle (Fig. 2), explique les différentes étapes de calcul du modèle.

Puisque l'estimation de la capacité d'infiltration (f) est faite par le modèle Green et Ampt, dans sa forme générale (Eq. 2), les paramètres du modèle PIR seront: la conductivité hydraulique K , le paramètre B qui est fonction de l'humidité du sol et de K .

$$f = K + \frac{B}{h_{ic}} \tag{2}$$

où: h_{ic} = hauteur d'eau infiltrée cumulée.

Ajustement des mesures expérimentales à la loi de Green et Ampt

Procédure de l'ajustement Un ajustement des valeurs expérimentales au modèle Green et Ampt a été réalisé pour déterminer les valeurs des paramètres K et B . Les mesures expérimentales nous ont permis d'avoir les masses d'eau ruisselée en fonction du temps. Nous déduisons les débits de ruissellement à partir de la relation:

$$Q \text{ (litres/s)} = \text{volume (litres)} / \text{temps (s)} \tag{3}$$

La hauteur de la pluie (h_{pl}) est déterminée à partir de son intensité (I) et le temps écoulé depuis le début de l'événement (Δt):

$$h_{pl} \text{ (mm)} = I \text{ (mm/s)} \times \Delta t \text{ (s)} \tag{4}$$

La hauteur d'eau d'infiltration (h_i) est déduite à partir de la différence entre h_{pl} et la hauteur du ruissellement total (h_{ruist}) (Eq. 5). En considérant l'hypothèse que l'évaporation au laboratoire est nulle, la hauteur de ruissellement total sera la somme du ruissellement pur (R_s) et la lame cumulée en surface (h_s) (Eq. 6). La valeur de h_i au pas i est estimée par l'équation 7, et la valeur de la hauteur d'infiltration cumulée est donnée par l'équation 8

$$h_i = h_{pl} - h_{ruist} \tag{5}$$

$$h_{ruist} = R_s + h_s \tag{6}$$

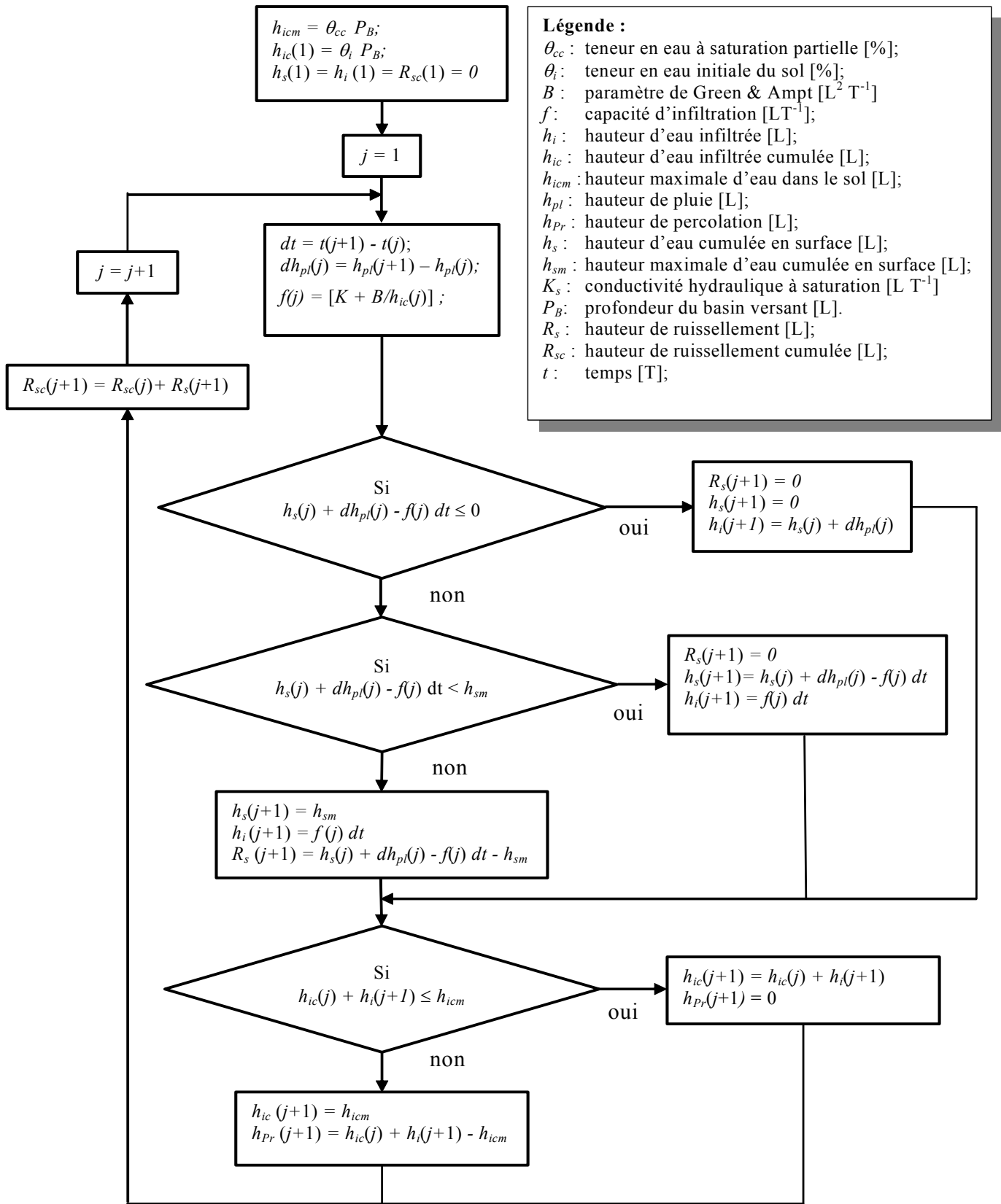


Fig. 2. Organigramme du modèle PIR.

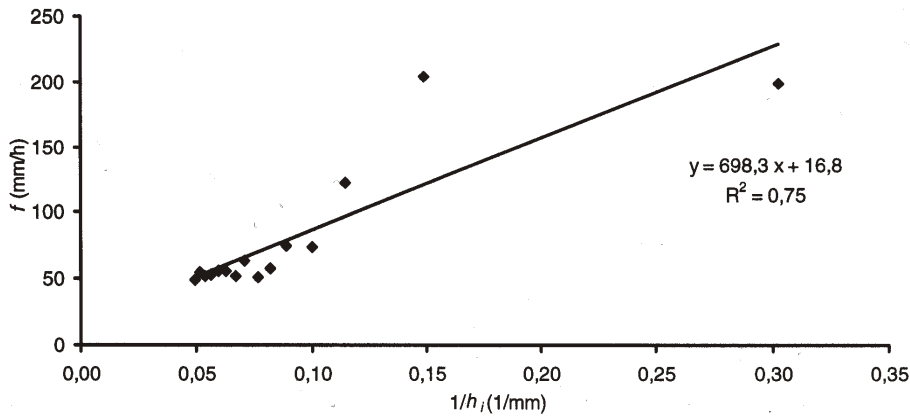


Fig. 3. Ajustement du modèle de Green et Ampt pour la première expérience.

$$h(i) = h_{pl}(i) - [R_s(i) + h_s(i)] \quad (7)$$

$$h_{ic}(i) = h_{pl}(i) - [R_s(i) + h_s(i)] + h_{ic}(1) \quad (8)$$

En acceptant l'hypothèse que la différence entre les lames cumulées en surface (Δh_s) aux pas de temps i et $i+1$ est nulle, l'expression de la capacité d'infiltration f devient:

$$f = \frac{\Delta h_{ic}}{\Delta t} = \frac{\Delta h_i}{\Delta t} = \frac{[h_{pl}(i+1) - R_s(i+1)] - [h_{pl}(i) - R_s(i)]}{t(i+1) - t(i)} \quad (9)$$

où:

h_{ic} = hauteur d'eau infiltrée cumulée et
 $h_{ic}(1)$ = hauteur d'eau infiltrée cumulée dans le sol au pas de temps initial.

Les valeurs de f sont portées sur un graphique en fonction de l'inverse de la hauteur d'eau infiltrée (h_i) pour déterminer les valeurs de K et B . En effet, l'ajustement de ce nuage de points à une régression linéaire permet de déterminer les valeurs expérimentales de K et B du modèle Green et Ampt sous sa forme généralisée. La figure 3 montre l'ajustement du modèle Green et Ampt à partir des valeurs de la première expérience. Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,75 dans ce cas. R^2 est une mesure globale de la qualité du modèle, il donne le pourcentage d'explication du modèle (Tomassone 1989). Le modèle Green et Ampt est donc bien approprié pour cette expérience.

Le calibrage du modèle Le calibrage automatique d'un modèle consiste à estimer ses paramètres en optimisant une fonction objective reliant les sorties (débits) observées et simulées (Sorrooshian et Arfi 1982; Vicky et al. 1998). La méthode du simplex a été utilisée dans ce travail pour le calibrage du modèle PIR. La fonction objective utilisée est celle des moindres carrés des erreurs sur les hauteurs de ruissellement de surface:

$$Fob = \sum [Rob(i) - Rsim(i)]^2 \quad (10)$$

où:

Fob = la valeur de la fonction objective,
 Rob_i = la hauteur de ruissellement observé au pas i et
 $Rsim_i$ = la hauteur de ruissellement simulée au pas i .

La méthode du Simplex La méthode du Simplex est une méthode multidimensionnelle de recherche globale de l'optimum. Elle se base sur une figure géométrique de dimension $N+1$ (N = nombre des paramètres), pour chercher l'optimum dans toutes les directions de l'espace. Cette méthode commence par un point choisi aléatoirement par l'opérateur, puis elle poursuit son exploration dans les directions du Simplex en comparant les

valeurs de la fonction objective pour expliquer le choix du Simplex. Elle garde toujours la valeur minimale et elle arrête son exploration lorsque la différence entre les valeurs successives de la fonction objective est égale à une erreur tolérée, ou lorsque le nombre maximum d'itérations est atteint. Cette méthode a été utilisée dans ce travail puisqu'elle n'impose pas la linéarité et la dérivabilité de la fonction objective. Contrairement à d'autres méthodes qui calculent la dérivée de la fonction objective (exemples: la méthode de Newton, la méthode du gradient).

Les données de calibrage Le calibrage du modèle a été réalisé, en première étape, à partir des mesures de la première expérience. Les paramètres de calibrage sont fixés à K et B et la lame d'eau cumulée en surface est à une constante égale à 2 mm. Dans une seconde étape, un calibrage synthétique a été réalisé. Le calibrage synthétique consiste à calibrer le modèle à partir des données générées par ce même modèle. Pour cela, des valeurs de débit synthétique ont été générées avec les caractéristiques de la première expérience ($I = 200$ mm/h, $T = 15$ min) et la quatrième expérience ($I = 60$ mm/h, $T = 60$ min). Le calibrage du modèle a été fait à partir de ces débits synthétiques. En dernière étape, des données de débits synthétiques ont été générées pour différents cas dont les paramètres K et B sont représentés au Tableau 2 (Rawls et Brakensiek. 1983; Brakensiek et al. 1982). Ces pseudo-sols ont été soumis, pendant une heure, à une intensité moyenne de pluie égale à 40 mm/h.

Tableau 2. Caractéristiques des sols utilisés pour synthétiser les débits.

Sol	K_s (mm/h)	B (mm ² /h)
1	20,0	910
2	10,0	375
3	0,5	80
4	2,0	360
5	20,0	800
6	6,0	480
7	5,0	875
8	1,0	120
9	0,5	120

Tableau 3. Valeurs et erreurs des paramètres de Green et Ampt obtenus par régression linéaire.

Expérience	K (mm/h)	B (mm ² /h)	Erreur (K)	Erreur (B)	R^2
1	16,77	698,30	12,48	112,06	0,75
2	9,33	380,50	9,33	49,76	0,78
3	17,19	56,72	4,01	33,94	0,48
4	15,78	113,62	2,01	29,25	0,19
5	10,68	128,80	2,27	31,57	0,42
6	12,59	92,80	1,24	16,79	0,50
10	8,78	159,48	6,81	107,72	0,11
11	12,11	14,50	0,83	7,40	0,14
12	17,26	19,04	1,93	12,58	0,07
13	12,91	15,54	1,62	10,64	0,15
15	10,56	111,64	7,69	94,92	0,12
16	0,75	119,7	0,22	65,25	0,23
17	11,32	33,79	1,34	8,40	0,57
19	8,4	95,74	5,52	31,27	0,32
Moyenne	12,59	147,73	4,39	42,02	-

RÉSULTATS et DISCUSSION

L'ajustement des mesures expérimentales au modèle de Green et Ampt a été réalisé pour toutes les expériences. Les valeurs des paramètres K et B , leurs erreurs d'estimation, ainsi que les valeurs de R^2 sont représentées par le Tableau 3. Les erreurs sont calculées à un niveau de confiance égale à 5%. Dans ce tableau, les expériences (7, 8, 9 et 14) sont éliminées puisqu'elles ont un nombre très réduit de points de mesures. D'après ce tableau, les valeurs du coefficient de détermination varient dans l'intervalle [0,07; 0,78]. Il est remarquable que les expériences (4, 10, 11, 12, 13 et 15) ont donné de faibles valeurs de R^2 . En effet, les nuages de points, [f = fonction ($1/h_{ic}$)] de ces expériences, montrent des allures de points dispersées ce qui indique que l'ajustement par une régression linéaire ne peut pas être approprié à ces mesures. Les expériences (3, 5, 6, 17 et 19) ont donné des coefficients de détermination assez élevées, les ajustements par le modèle Green et Ampt sont donc acceptables.

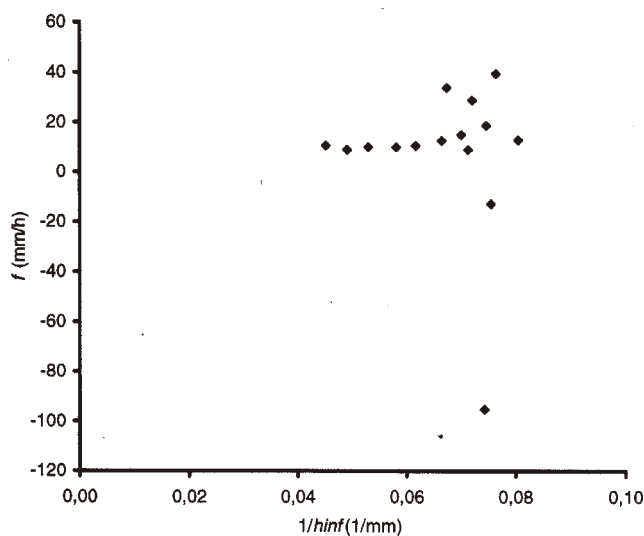


Fig. 4. Nuage des points $f=f(1/h_i)$ de la dixième expérience.

Tableau 4. Valeurs des rapports K/K_s .

Expérience	K (mm/h)	K/K_s
1	16,77	0,93
2	9,33	0,51
3	17,19	0,95
4	15,78	0,87
5	10,68	0,59
6	12,59	0,69
10	8,78	0,48
11	12,11	0,67
12	17,26	0,96
13	12,91	0,71
15	10,56	0,58
17	11,32	0,62
19	8,40	0,46
Moyenne	12,59	0,69

Les meilleurs coefficients sont donnés par les première et deuxième expériences, qui ont la particularité d'avoir une forte intensité de pluie. Les ajustements par le modèle Green et Ampt sont bien appropriés à ces cas. Le Tableau 3 montre qu'une large erreur est obtenue sur les paramètres K et B . D'autre part, il est à remarquer que les valeurs de conductivité hydraulique varient dans l'intervalle [8,4; 16,77], donc toujours inférieures à la valeur de la conductivité hydraulique de saturation ($K_s = 18$ mm/h), ceci coïncide avec la réalité physique du phénomène puisque, avant saturation, seulement une portion des pores du sol contribue au drainage.

La figure 4 représente le nuage de points des valeurs de f en fonction de l'inverse de la hauteur d'eau infiltrée ($1/h_{ic}$), de la dixième expérience. Deux valeurs négatives de f sont observées et représentent des points singuliers dans ce nuage. Leur présence s'explique par le fait que l'hypothèse admise lors du calcul de la capacité d'infiltration (variation de la lame cumulée en surface est nulle) n'est pas satisfaite pour ces deux mesures. En effet, cet événement est relatif à une pluie synthétique composé d'une faible intensité (d'une durée de 50 min) suivie d'une forte intensité (10 min), puis d'une faible intensité pendant 50 min. Ainsi lors du passage de la forte à la faible intensité une importante lame d'eau s'accumule en surface donc, la différence entre les lames d'eau n'est plus négligeable et notre hypothèse qui néglige cette différence, ne peut être applicable pendant une certaine période.

De même, des études faites par Bouwer (1969) ont montré que $K = 0,5 K_s$, pour tout les sols. Nos mesures expérimentales ont montré que, $K = \text{coef } K_s$, où $\text{coef} < 1$, le Tableau 4 résume les valeurs du rapport K/K_s . Les valeurs de ces rapports sont d'une moyenne égale à 0,69, ce qui est comparable aux résultats de Bouwer (1969).

En première étape, le calibrage du modèle PIR est réalisé, par la méthode du Simplex, à partir des données expérimentales. Au cours de l'optimisation, la méthode a divergé. En effet, le résultat de l'optimisation dépend des valeurs initiales des paramètres, et certaines valeurs causent un arrêt prématuré de la stratégie d'optimisation. Les difficultés de l'optimisation de la fonction sont dues à la forme de la fonction objective. La figure 5 montre le graphique de la fonction objective en fonction

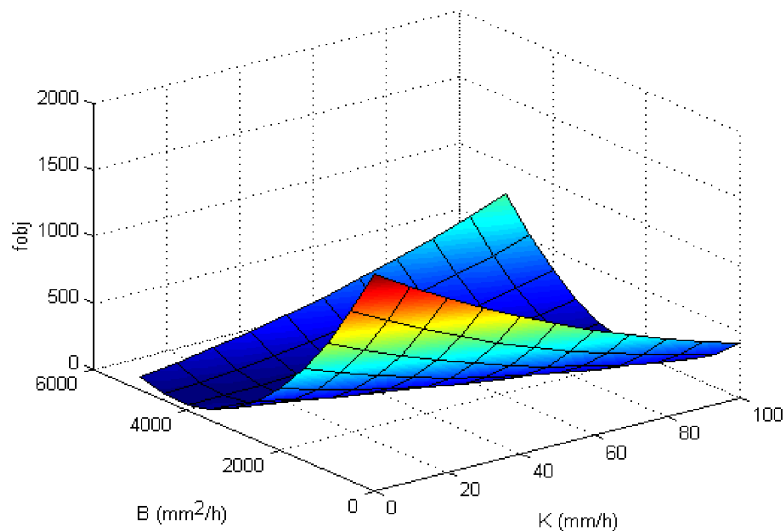


Fig. 5. Fonction objective relative à la première expérience.

des paramètres K et B pour les données de la première expérience. Cette fonction est caractérisée par une allure de plateaux et de vallées. Dans la zone des plateaux, la fonction objective est à son maximum et les paramètres sont bien loin de l'optimum. C'est dans la zone des vallées que l'optimum est localisé et ceci qui rend l'optimisation difficile. D'autre part, en examinant l'ordre de l'erreur avec laquelle les paramètres K et B sont déterminés à partir de l'ajustement à une régression linéaire, il est remarquable que l'erreur est du même ordre de grandeur que le paramètre même d'où la conclusion que les valeurs des paramètres localisées dans les vallées sont analytiquement équivalentes.

Dans une seconde étape, des données de ruissellement synthétiques ont été générées à partir des données pluviométriques et des paramètres de sol relatifs à la première et la quatrième expérience ($K_s = 18$ mm/h). La fonction objective générée par le calibrage synthétique à partir de ces données, montre que l'allure des fonctions objectives persiste, ainsi cette allure n'est pas due aux erreurs expérimentales.

Dans une troisième étape, le calibrage du modèle est réalisé à partir des données synthétisées par le modèle pour différents cas et différentes intensités. Les mêmes difficultés d'optimisation (dépendance de la valeur initiale et arrêt prématuré de la stratégie), rencontrées par le calibrage à partir des valeurs expérimentales, sont réapparues. La forme des fonctions objectives a été conservée (c'est-à-dire la présence plateaux et de vallées). Ce résultat a été retrouvé même pour des calibrages synthétiques (données de débits générées par le modèle) à différentes intensités et durées de pluies et différents paramètres de sols. En effet, les paramètres optimaux (résultats de l'optimisation) dépendent des valeurs des paramètres initiales prises au début du calibrage. L'observation des résultats du calibrage du modèle conceptuel PIR à partir des données synthétiques pour différents cas, il a été remarqué que les courbes de la fonction objective gardent la même allure générale que celle des courbes de la fonction objective fournies par les expériences, c'est-à-dire la présence de vallées et d'optimums multiples.

Ces difficultés de calibrage sont essentiellement dues au fait que les paramètres K et B sont fortement corrélés entre eux à partir de l'expression du paramètre B :

$$B = K\Delta\theta\psi \quad (11)$$

où:

$\Delta\theta$ = la variation de la teneur en eau dans le sol [%] et

ψ = le potentiel au front mouillant [L].

Toutefois cette corrélation est essentiellement due aux interactions entre les paramètres K et ψ , ce qui rend le calibrage du modèle difficile. En effet nous avons essayé d'isoler le paramètre K et réaliser le calibrage avec un paramètre B_f ($B_f = \Delta\theta\psi$), mais cette stratégie n'a pu résoudre ces difficultés de calibrage.

CONCLUSION

Un modèle conceptuel global à deux réservoirs couplé au modèle Green et Ampt a été développé. Ce modèle a trois paramètres: deux relatifs aux caractéristiques du sol K et B et la lame cumulée en surface. Dans ce travail, la lame cumulée en surface a été fixée au cours du calibrage du modèle. Les paramètres du sol, qui sont ceux du modèle Green et Ampt, ont fait l'objet du calibrage du modèle. Ce modèle simule le ruissellement de surface et l'infiltration au sol à partir des données pluviométriques avec des intensités de pluie variant de 10 à 200 mm/h. Des expériences au laboratoire ont été réalisées pour le calibrage des paramètres de ce modèle. Ces mesures expérimentales ont été ajustées au modèle Green et Ampt. Ces ajustements ont donné une large erreur d'estimation des valeurs de conductivité hydraulique K et le paramètre B , cette erreur peut atteindre 75% de la valeur du paramètre. Toutefois, les valeurs des rapports de la conductivité hydraulique par la conductivité hydraulique à saturation (K/K_s) sont comparables aux résultats de l'étude de Bouwer (1969).

La méthode du Simplex appliquée pour l'optimisation des paramètres K et B du modèle Green et Ampt, à partir des mesures expérimentales et des données synthétiques avec les mêmes conditions expérimentales, a divergé. Cette divergence est due à la forme complexe de la fonction objective due aux interactions entre les paramètres. Le calibrage synthétique a été fait, aussi, pour des données générées par le modèle pour différents cas représentant des types de sols hypothétiques soumis à une intensité moyenne de 40 mm/h pendant 60 minutes. La forme de la fonction objective persiste; donc elle est indépendante des caractéristiques du sol. Les valeurs des paramètres de la conductivité hydraulique K et le paramètre B , résultats de la méthode d'optimisation, sont du même ordre de grandeur que celles qui sont obtenues par les ajustements des résultats expérimentaux avec le modèle Green et Ampt. Ainsi, le modèle PIR peut donner une estimation de l'ordre de grandeur des paramètres physiques du sol: K et B . Toutefois, d'autres méthodes d'optimisation, comme les méthodes probabilistes, peuvent être utilisées pour améliorer les résultats et optimiser le temps du calcul.

LISTE DES SYMBOLES

B	paramètre Green et Ampt [L^2/T]
f	capacité d'infiltration [L/T]
F_{ob}	fonction objective [L^2]
h_i	hauteur d'eau infiltrée [L]
$h_{ic(1)}$	hauteur d'eau infiltrée cumulée dans le sol initialement [L]
h_{ic}	hauteur d'eau infiltrée cumulée [L]
h_{icm}	hauteur maximale d'eau dans le sol [L]
h_{pl}	hauteur de pluie [L]
h_{ruist}	hauteur de ruissellement total [L]
h_s	hauteur de la lame d'eau cumulée en surface [L]
h_{sm}	hauteur maximale de la lame d'eau cumulée en surface [L]
K	conductivité hydraulique du sol [L/T]
K_s	conductivité hydraulique du sol à saturation [L/T]
PIR	Pluie-infiltration-ruissellement
R_{ob}	hauteur de ruissellement observé [L]
R_s	hauteur de ruissellement [L]
R_{sim}	hauteur de ruissellement simulée [L]
t	temps [T]
$\Delta\theta$	variation de la teneur en eau dans le sol [%],
ψ	le potentiel au front mouillant [L]

RÉFÉRENCES

- Avendano, F. 1998. Conception d'un banc d'essai des processus hydrologiques et études d'érosion et d'infiltration. Thèse de maîtrise. Montréal, QC: Département du génie civil, École de Technologie Supérieure.
- Bâ, K.M. 1994. Critères de sensibilité des modèles mathématiques en hydrologie. Thèse de doctorat. Québec, QC: Département des sols, Université Laval.
- Bard, Y. 1974. *Nonlinear Parameter Estimation*. New York, NY: Academic Press.
- Bouwer, H. 1969. Infiltration of water into non uniform soil. *Journal of Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers* 95 (IR4): 451-462.
- Brakensiek, D.L., W.J. Rawls et B. Soni. 1982. Infiltration parameter values for transient soil conditions. ASAE Paper No. 82-2589. St. Joseph, MI: ASAE.
- Chérif, R. 2003. Application des algorithmes génétiques pour le calibrage d'un modèle hydrologique couplé. Thèse de doctorat. Québec, QC: Département du Génie Civil, Université Laval.
- Green, W.H et C.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics of flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4: 1-24.
- Hillel, D. 1988. *L'eau et le Sol. Principes et Processus Physiques*. Collection PEDASUP, 2nd edition. La Neuve, Belgique: ACADEMIA edition et diffusion, Université Catholique de Louvain.
- Holtan, H.N. 1961. A concept of infiltration estimates in watershed engineering. ARS Publication 41-51. Washington, DC: USDA.
- Horton, R.I. 1938. The interpretation and application of runoff plot experiments with reference to soil erosion problems. In *Proceedings/Soil Science Society of America* 3: 340-349.
- Hydrologic Engineering Center. 2000. HEC-HMS hydrologic modeling system. Technical reference manual, CPD-74B. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- Jetten, V. 2002. LISEM user manual, version 2.x. Draft version January 2002. Utrecht, Netherlands: Utrecht Center for Environment and Landscape Dynamics, Utrecht University.
- Johnston, P.R et D. Pilgrim. 1976. Parameter optimization for watershed models. *Water Resources Research* 12 (3): 477-486.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficients of water percolation in soils. In Sixth committee of the *International Society Soil Science*, Part (A) 15-21. Moscow, Russia.
- Morin, G., P. Paquet. et W. Sochanski. 1995. CEQUEAU: Manuel de référence. Québec, QC: INRS-EAU.
- Musy, A. et M. Soutter. 1991. *Physique du Sol*. Lausanne, Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Nelder, J.A. et R. Mead. 1965. A Simplex method for function minimisation. *Computer Journal* 7: 308-313.
- Nicks, A.D., L.J. Lane et G.A. Gander. 2002. Weather generator. In *Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*, Chapter 2. Report 10 NSERL. West Lafayette, IN: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP).
- Pickup, G. 1977. Testing the efficiencies of algorithms and strategies for automatic calibration of rainfall-runoff models. *Hydrogeological Science Bulletin* 22 (2): 257-274.
- Rawls, W.J. et D.L. Brakensiek. 1983. A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. In *Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration*, 102-112. St. Joseph, MI: ASAE.
- Singh, V. P. 1995. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, CO: Water Resources Publications.
- Sorooshian, S. et F. Arfi. 1982. Response surface parameter sensitivity analysis methods for post calibration studies. *Water Resources Research* 18 (5): 1531-1538.
- Sorooshian, S. et J.A. Dracup. 1980. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and heteroscedastic error cases. *Water Resources Research* 16(2): 430-442.
- Sugawara, M., I. Watanabe, E. Ozaki et Y. Katsuyama. 1984. Tank model with snow component. Research note 65. Tokyo, Japan: The National Research Center for Disaster Prevention.
- Tomassone, R. 1989. Comment interpréter les résultats d'une régression linéaire. Paris, France: Institut Technique des Céréales et des Fourrages I.N.A.P.G.
- USDA. 1995. Hillslope Profile and Watershed Model, Water Erosion Prediction Project. <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/docs/readme.htm>. (2004/10/05)
- Vicky, L.F., L.L. Vicente et H. Mariano. 1998. Parameter identifiability for catchment scale-erosion modelling: A comparison of optimization algorithms. *Journal of Hydrology* 207: 83-97.
- Yapo, P.O., H.V. Gupta et S. Sorooshian. 1998. Multiobjective global optimisation for hydrologic models. *Journal of Hydrology* 204: 83-97.