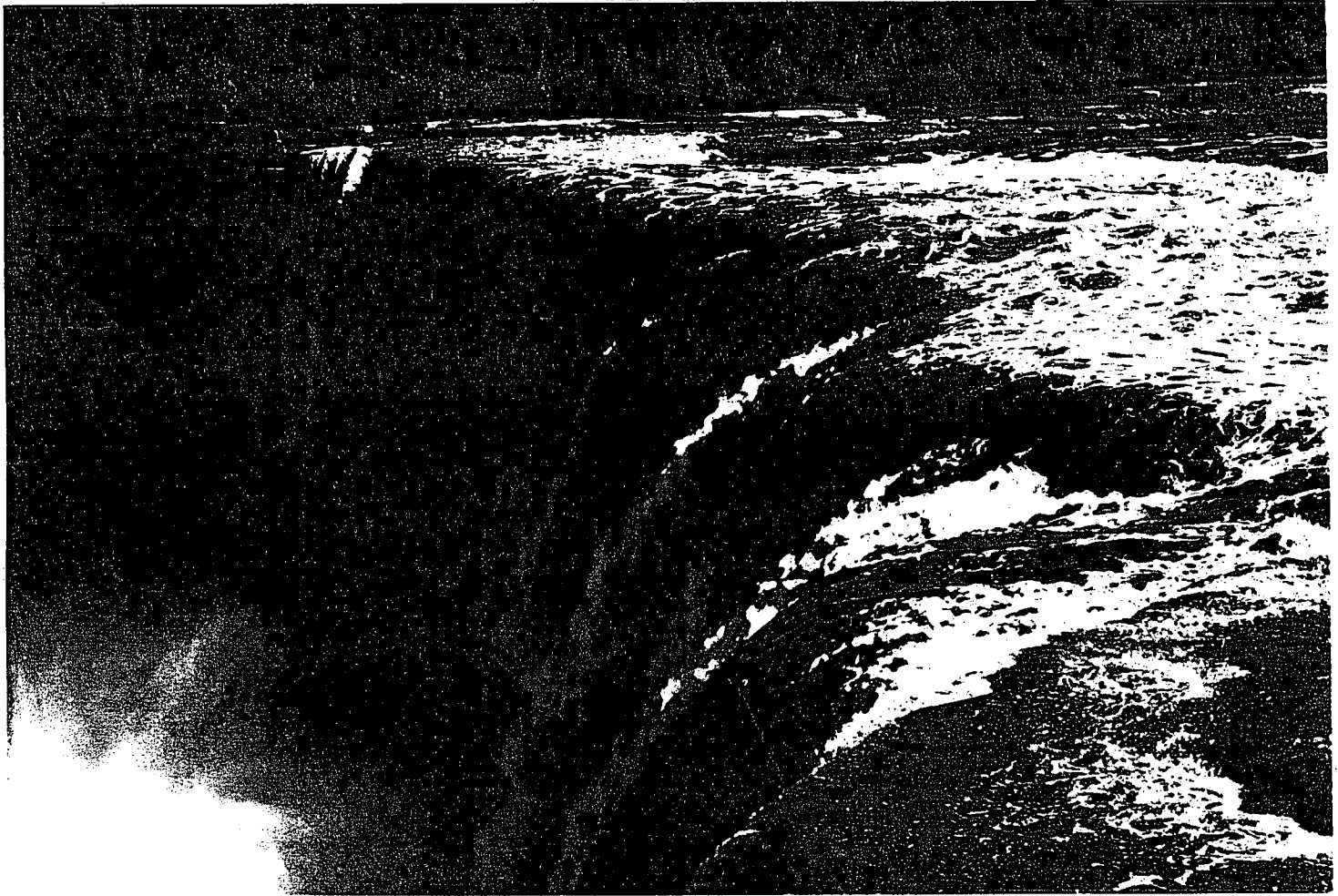


Adaptation d'un modèle ALLUDAS  
à un ordinateur de poche



GB  
707  
C338  
no. 120F

ETUDE N° 190 COLLECTION DES RAPPORTS  
TECHNIQUES

INSTITUTION NATIONALE DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIELLE  
MISE EN MARCHÉ EN FAVORISANT LE DÉVELOPPEMENT  
D'UNE CULTURE DES RECHERCHES INDUSTRIELLES  
ET SCIENTIFIQUES



Environnement  
Canada

Environment  
Canada

# **Adaptation du modèle ILLUDAS à un ordinateur de pupitre**

**J. Marsalek**

**ÉTUDE N° 120, COLLECTION DES RAPPORTS  
TECHNIQUES**

**INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES SUR LES EAUX  
DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES  
CENTRE CANADIEN DES EAUX INTÉRIEURES  
BURLINGTON (ONTARIO) 1981**

**Canada**

## AVANT-PROPOS

Le présent rapport se fonde sur un projet de rapport soumis par la société Bessette, Crevier, Parent, Tanguay et Associés (BCPTA) au Ministère des Approvisionnement et Services, dans le cadre d'un contrat. M. G. Patry et Mme L. Raymond, de la société BCPTA, se sont chargés de l'élaboration, de l'essai et de l'analyse de la sensibilité du modèle ILLUDAS modifié.

L'auteur a assuré la direction technique du projet en tant qu'agent de liaison, a fourni les données nécessaires pour l'essai du modèle et a rédigé le présent rapport sommaire.

## PERSPECTIVE DE GESTION

Les modèles d'ordinateur destinés au design d'ingénierie doivent être vérifiés avec précision afin d'établir des résultats fiables. Le présent rapport sert à vérifier une nouvelle technique et montre clairement qu'il est possible d'obtenir des résultats probants avec un modèle de ruissellement urbain (modèle ILLUDAS), en utilisant des ordinateurs de pupitre dont le coût est relativement peu élevé.

Les résultats peuvent servir lorsqu'il est possible de calculer les vitesses et quantités de ruissellement provenant des précipitations.

T.M. Dick, Chef

Division de l'Hydraulique

## RESUME

On a modifié la version normale du modèle ILLUDAS écrit pour l'ordinateur IBM 360/75 et on l'a adaptée à un ordinateur de pupitre Hewlett-Packard 9830. On a vérifié le modèle modifié sur une prise d'eau d'essai et on l'a soumis à une analyse de la sensibilité.

Pour une petite prise d'eau à cours simple, le modèle modifié a fonctionné aussi bien que les modèles classiques qui nécessitent des systèmes informatiques puissants.

## ABSTRACT

The standard version of the ILLUDAS model written for the IBM 360/75 computer was modified and adopted to a Hewlett-Packard 9830 desk-top computer. The modified model was verified on a test catchment and subjected to a sensitivity analysis.

For a small catchment with simple flow routing, the modified model performed equally as well as conventional models requiring large computer systems.

## TABLE DES MATIERES

	Page
AVANT-PROPOS .....	iii
PERSPECTIVE DE GESTION .....	v
RESUME .....	vii
ABSTRACT .....	vii
INTRODUCTION .....	1
DESCRIPTION DE LA VERSION MODIFIEE DU MODELE ILLUDAS .....	2
Calcul du ruissellement .....	2
Cours .....	5
Nouvelles caractéristiques du modèle ILLUDAS modifié .....	7
PROGRAMME ILLUDAS MODIFIE .....	13
Description du matériel d'ordinateur .....	15
Programme interactif .....	15
Organigramme de programmation .....	16
VERIFICATION DU MODELE ILLUDAS MODIFIE .....	16
Description de la surface de captation d'essai .....	16
Données pluviométriques et de ruissellement utilisées pour la vérification .....	17
Simulations du ruissellement sur l'ILLUDAS modifié .....	17
COMPARAISON DES SIMULATIONS ILLUDAS ET SWMM POUR LA SURFACE DE CAPTATION DE MALVERN .....	22
ANALYSE DE LA SENSIBILITE DU MODELE ILLUDAS MODIFIE .....	23
Entrée de données pluviométriques de calcul .....	24
Paramètres hydrologiques et hydrauliques .....	27
Techniques de simulation .....	33
Mode de simulation .....	34

	Page
<b>SOMMAIRE ET CONCLUSIONS</b> .....	34
<b>REFERENCES</b> .....	38
<b>APPENDICE</b> .....	59

ILLUSTRATIONS

	Page
<b>Figure 1. Méthode ILLUDAS de calcul du ruissellement provenant des surfaces imperméables</b> .....	4
<b>Figure 2. Méthode ILLUDAS de calcul du ruissellement provenant des surfaces perméables</b> .....	6
<b>Figure 3. Schéma d'acheminement de l'emmagasinement</b> .....	8
<b>Figure 4. Emmagasinement de l'eau de ruissellement sur les chaussées</b> .....	12
<b>Figure 5. Système d'ordinateur de pupitre utilisé dans l'étude</b> .....	14
<b>Figure 6. Organigramme du modèle ILLUDAS modifié (réf. 3)</b> .....	17
<b>Figure 7. Paramètres des hydrogrammes de ruissellement observés et simulés</b> .....	19

TABLEAUX

	Page
1. Conditions d'humidité antérieure des surfaces perméables .....	41
2. Surface de captation de Malvern - Caractéristiques .....	41
3. Surface de captation de Malvern - Evaluation des paramètres utilisés dans les études antérieures .....	42
4. Surface de captation de Malvern - Egouts pluviaux .....	43
5. Caractéristiques des cas de vérification .....	44
6. Surface de captation de Malvern - Représentation discrète pour les simulations ILLUDAS .....	45
7. Résultats de la vérification obtenus sur le modèle ILLUDAS modifié ...	46
8. Comparaison des résultats de la vérification obtenus sur les modèles ILLUDAS et SWMM .....	47
9. Analyse de la sensibilité - Variations des paramètres d'entrée .....	48
10. Sensibilité des pointes et des volumes de ruissellement à la période de récurrence de l'averse .....	49
11. Sensibilité des paramètres des hydrogrammes de ruissellement à la durée de l'averse .....	49
12. Sensibilité des pointes et volumes de ruissellement à l'intensité de pointe .....	50
13. Sensibilité des paramètres des hydrogrammes de ruissellement à l'échelon temps de simulation .....	50
14. Sensibilité des pointes et volumes de ruissellement à la perte initiale à soustraire .....	51



	Page
15. Débits de pointe de ruissellement et volumes de ruissellement en fonction des éléments suivants: divers sols et conditions d'humidité antérieure, averse d'une période de récurrence de 5 ans, surface perméables drainées - jardins avant .....	52
16. Débits de pointe de ruissellement et volumes de ruissellement en fonction des éléments suivants: divers sols et conditions d'humidité antérieure, averse d'une période de récurrence de 10 ans, surfaces perméables drainées - jardins avant .....	53
17. Débits de pointe de ruissellement et volumes de ruissellement en fonction des éléments suivants: divers sols et conditions d'humidité antérieure, averse d'une période de récurrence de 5 ans, surfaces perméables drainées - jardins avant et arrière .....	54
18. Sensibilité des pointes et volumes de ruissellement à la procédure de calcul du temps d'admission .....	55
19. Sensibilité des pointes de ruissellement à la rugosité des tuyaux .....	55
20. Sensibilité des pointes et des volumes de ruissellement au détail de la représentation discrète des surfaces de captation - averse d'une période de récurrence de 5 ans .....	56
21. Sensibilité des pointes et des volumes de ruissellement au détail de la représentation discrète de la surface de captation - Cas de vérification .....	57
22. Débits de pointe et temps jusqu'à la pointe pour divers modes de simulation .....	58

## Adaptation du modèle ILLUDAS à un ordinateur de pupitre

J. Marsalek

### INTRODUCTION

De nombreux modèles informatiques pour la simulation du ruissellement urbain ont été élaborés dans le courant des dernières années. A mesure que ces modèles se sont perfectionnés, il a fallu également perfectionner les ordinateurs utilisés pour les exécuter. Aussi a-t-on craint que l'augmentation de l'utilisation des modèles de ruissellement urbain ne risque d'être entravée du fait que les petites municipalités et sociétés d'ingénierie pourraient trouver trop coûteux ou incommode de se servir de grands ordinateurs commerciaux. D'autre part, les petits ordinateurs de pupitre se généralisent, et même les petits bureaux peuvent se les permettre. C'est pourquoi on a pensé qu'en adaptant l'un de ces modèles à un ordinateur de pupitre, on inciterait les intéressés à utiliser davantage les modèles de ruissellement. Le modèle à choisir devait être relativement simple et bien accepté par le milieu de l'ingénierie. Ces deux objectifs sont réalisés par le modèle ILLUDAS (Illinois Urban Drainage Area Simulator), élaboré par l'Illinois State Water Survey (5).

Le Ministère des Approvisionnements et Services a passé avec la société d'ingénierie Bessette, Crevier, Parent, Tanguay et Associés (BCPTA) un contrat pour l'élaboration d'une version ordinateur de pupitre du modèle ILLUDAS. On peut résumer le cahier des charges comme suit:

- 1) Elaborer une version ordinateur de pupitre du modèle ILLUDAS.
- 2) Vérifier cette version ILLUDAS sur une surface de captation d'essai.
- 3) Mener une analyse de la sensibilité de cette version ILLUDAS.

Le rapport ci-après expose les résultats de l'étude menée par la société BCPTA.

## DESCRIPTION DE LA VERSION MODIFIEE DE L'ILLUDAS

La nouvelle version du modèle ILLUDAS qui a été modifié en vue d'être utilisé sur un ordinateur de pupitre conserve non seulement toutes les caractéristiques du modèle ILLUDAS original (version 1974, réf. 5), mais elle y ajoute aussi certaines nouvelles caractéristiques. Nous commencerons donc par décrire la version originale, puis nous passerons à la description des caractéristiques nouvellement ajoutées.

### Calcul du ruissellement

Pour le calcul du ruissellement, on divise la surface de captation à l'étude en sous-surfaces de captation qui représentent des éléments de surface homogènes contribuant à un seul tuyau d'égout. Sur chaque sous-surface, on considère deux types de surfaces: les surfaces revêtues directement reliées et les surfaces perméables (herbeuses). Les calculs du ruissellement diffèrent dans chaque cas.

Pour les surfaces revêtues directement reliées, il faut évaluer deux facteurs physiques, à savoir la surface et le temps de parcours du point le plus éloigné jusqu'au point d'admission. A l'aide de cette information, on trace une courbe du temps de parcours jusqu'au point d'admission en fonction de la surface contributive (voir la figure 1). On peut rectifier cette courbe en traçant une droite reliant le point correspondant à la surface contributive totale et l'origine (5).

La pluviosité est décrite en tant que fonction échelon, où la longueur de l'échelon représente un échelon de temps de calcul pendant lequel on admet que l'intensité pluviale est constante.

De la pluviosité on soustrait certaines pertes. Sur les surfaces revêtues, il s'agit de la perte initiale de mouillage de la surface et de la perte due à l'emmagasinement dans les dépressions du sol. Ces deux pertes sont typiquement combinées pour représenter la perte initiale à soustraire de la pluviosité. Le reste donnera alors le ruissellement provenant de la surface revêtue.

L'élaboration de l'hydrogramme de ruissellement est illustrée à la figure 1 et peut être décrite comme suit:

$$Q_1 = i_1 A_1$$

$$Q_2 = i_1 A_2 + i_2 A_1$$

.

.

.

$$Q_n = i_1 A_n + i_2 A_{n-1} + \dots + i_n A_1 \quad (1)$$

où  $Q$  est le débit de ruissellement,  $i$  l'apport d'eau (intensité pluviale moins les pertes),  $A$  la surface contributive, et les indices correspondent aux échelons de temps comptés depuis le début de l'averse.

Le calcul du ruissellement provenant des surfaces perméables (herbeuses) est fort semblable à celui décrit ci-dessus pour les surfaces revêtues. Ici encore, on trace la courbe du temps de parcours jusqu'au point d'admission en fonction de la surface contributive. Il faut toutefois apporter certaines modifications à la pluviosité. On ajoute d'abord aux données d'entrée sur la hauteur de pluie reçue par les surfaces perméables le ruissellement supplémentaire provenant des surfaces imperméables qui s'écoule sur les surfaces perméables (voir fig. 2). On ôte alors de la pluviosité la perte initiale à soustraire et les pertes d'infiltration. Il faut considérer en premier la perte initiale à soustraire, avant toute infiltration. Des courbes d'infiltration ont été élaborées pour les groupes type de sols hydrologiques A, B, C et D classifiés par le Soil Conservation Service des États-Unis. Si l'on veut utiliser convenablement ces courbes d'infiltration, les

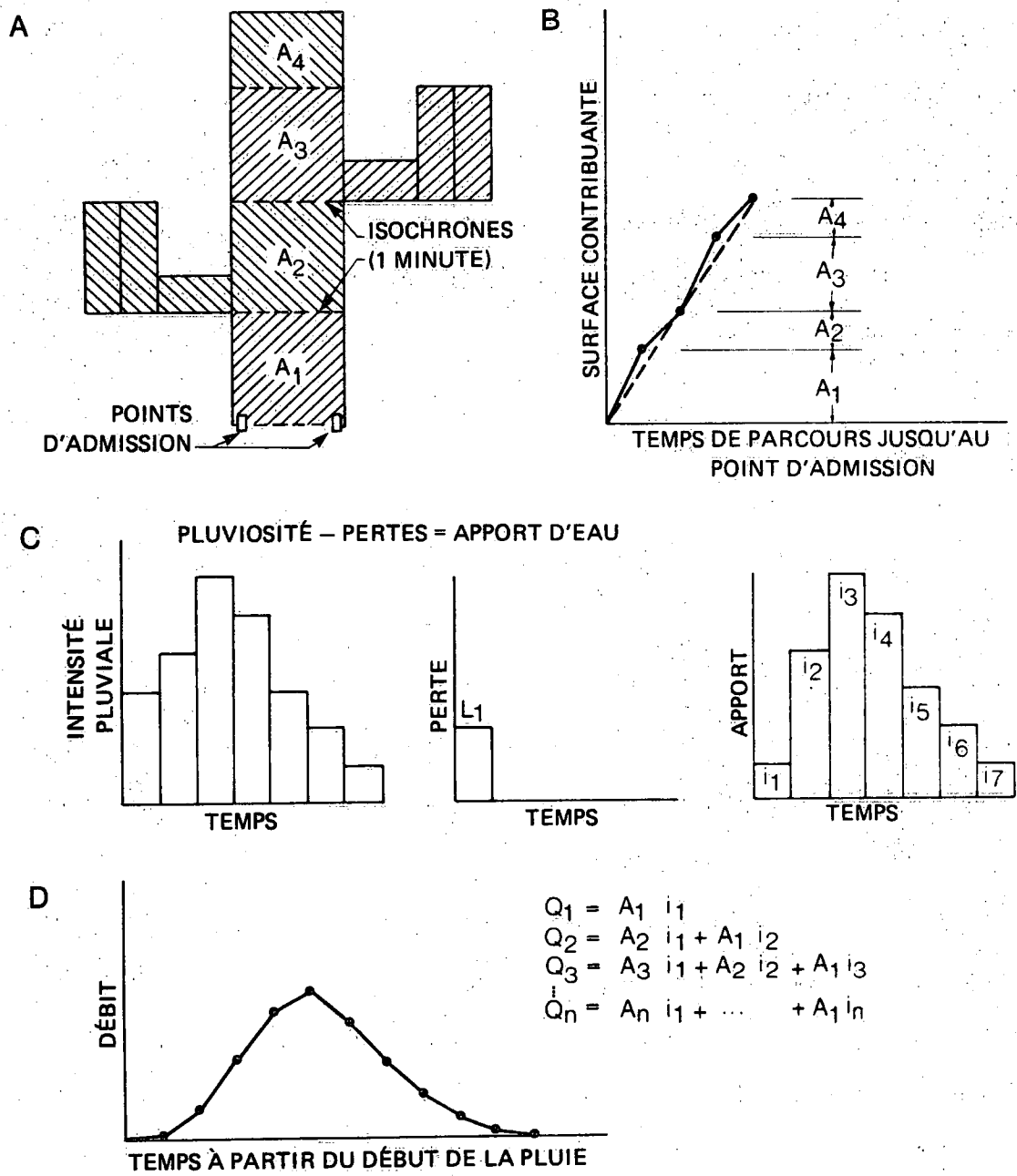


Figure 1. Méthode ILLUDAS de calcul du ruissellement provenant des surfaces imperméables

conditions d'humidité antérieure en vigueur au moment d'une averse particulière doivent être évaluées et classifiées comme l'indique le tableau 1. Les indices d'humidité antérieure du tableau 1 se fondent sur la hauteur cumulée de pluie enregistrée pendant les cinq jours précédant l'averse.

En soustrayant de la pluviosité les pertes, on obtient l'apport, qui est utilisé pour calculer l'hydrogramme du ruissellement provenant des surfaces perméables.

Les hydrogrammes du ruissellement provenant des surfaces revêtues et des surfaces perméables sont combinés pour chaque sous-surface de captation en un seul hydrogramme qui devient alors une entrée pour le réseau d'égouts.

### Cours

On utilise une technique simple d'acheminement de l'eau d'emmagasinement pour transférer l'hydrogramme d'un point d'entrée à l'autre. Dans ce but, on élabore une courbe d'emmagasinement-débit pour chaque tronçon de canal ou de tuyau situé entre les points d'entrée. On utilise d'abord l'équation de Manning pour calculer la courbe d'emmagasinement-débit du tronçon étudié. A partir des dimensions longitudinales et transversales du tronçon, on calcule alors la courbe d'emmagasinement-débit en admettant que le débit est uniforme dans ce tronçon. Les erreurs causées par cette hypothèse sont réduites au minimum en gardant l'incrément de temps et la longueur du tronçon aussi courts que possible (5).

La procédure d'acheminement ILLUDAS est illustrée à la figure 3. La courbe supérieure,  $0Q_{1\text{entrée}} Q_{2\text{entrée}}$ , est une section de l'hydrogramme d'entrée à l'extrémité supérieure du tronçon. La courbe inférieure,  $0Q_{1\text{sortie}} Q_{2\text{sortie}}$ , est une section de l'hydrogramme de sortie à l'extrémité inférieure du tronçon. En utilisant la notation de la figure 3, on peut écrire:

$$\frac{1}{2} Q_{1\text{entrée}} \Delta t = \frac{1}{2} Q_{1\text{sortie}} \Delta t + S \quad (2)$$

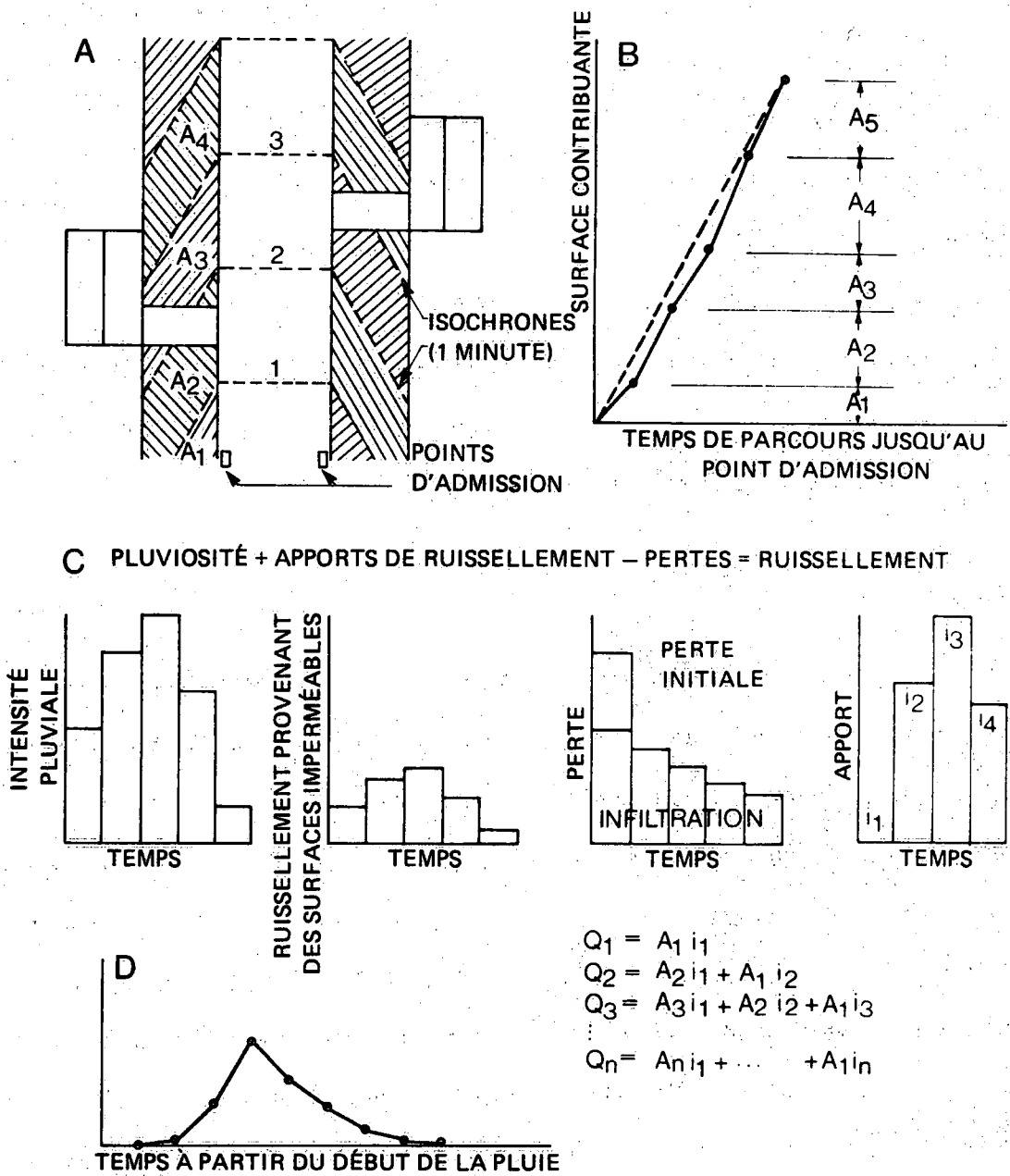


Figure 2. Méthode ILLUDAS de calcul du ruissellement provenant des surfaces perméables

Comme on connaît  $Q_{1\text{entrée}}$  et  $\Delta t$  et que l'on peut exprimer  $S_1$  en fonction de  $Q_{1\text{sortie}}$  à l'aide de la courbe d'emmagasinement-débit, on peut résoudre l'équation 2 pour  $Q_{1\text{sortie}}$ .

Pour l'échelon de temps suivant,

$$(Q_{1\text{entrée}} + Q_{2\text{entrée}} - Q_{1\text{sortie}}) \Delta t/2 + S_1 = Q_{2\text{sortie}} \Delta t/2 + S_2 \quad (3)$$

On connaît le premier membre de l'équation 3 et on peut résoudre le second membre pour  $Q_{2\text{sortie}}$  en utilisant la relation d'emmagasinement-débit pour évaluer  $S_2$ . A l'aide de cette procédure progressive, on peut déterminer toutes les ordonnées de l'hydrogramme aval.

Le modèle ILLUDAS incorpore également des bassins de retenue dans le système d'égouts. Lorsqu'il analyse un système d'égouts existant, le modèle cumule les débits supérieurs à la capacité du tronçon, pour chaque tronçon de la surface de captation. Le volume maximal cumulé est reporté dans la sortie et équivaut à l'emmagasinement de retenue nécessaire pour que le système continue à fonctionner à pleine capacité.

Pour un nouveau calcul de drainage, l'utilisateur peut spécifier le volume d'emmagasinement de retenue permissible à tout point de la surface de captation. Le modèle incorporera alors ce volume dans le calcul en remplissant le volume d'emmagasinement permissible à l'aide des débits d'entrée.

#### Nouvelles caractéristiques du modèle ILLUDAS modifié

Dans de nombreux projets entrepris par la société BCPTA, des applications pratiques de l'ILLUDAS ont montré que l'on pouvait augmenter appréciablement la versatilité du modèle en ajoutant certaines nouvelles caractéristiques au modèle original (version 1974). Les caractéristiques nouvellement ajoutées sont décrites ci-dessous (3).



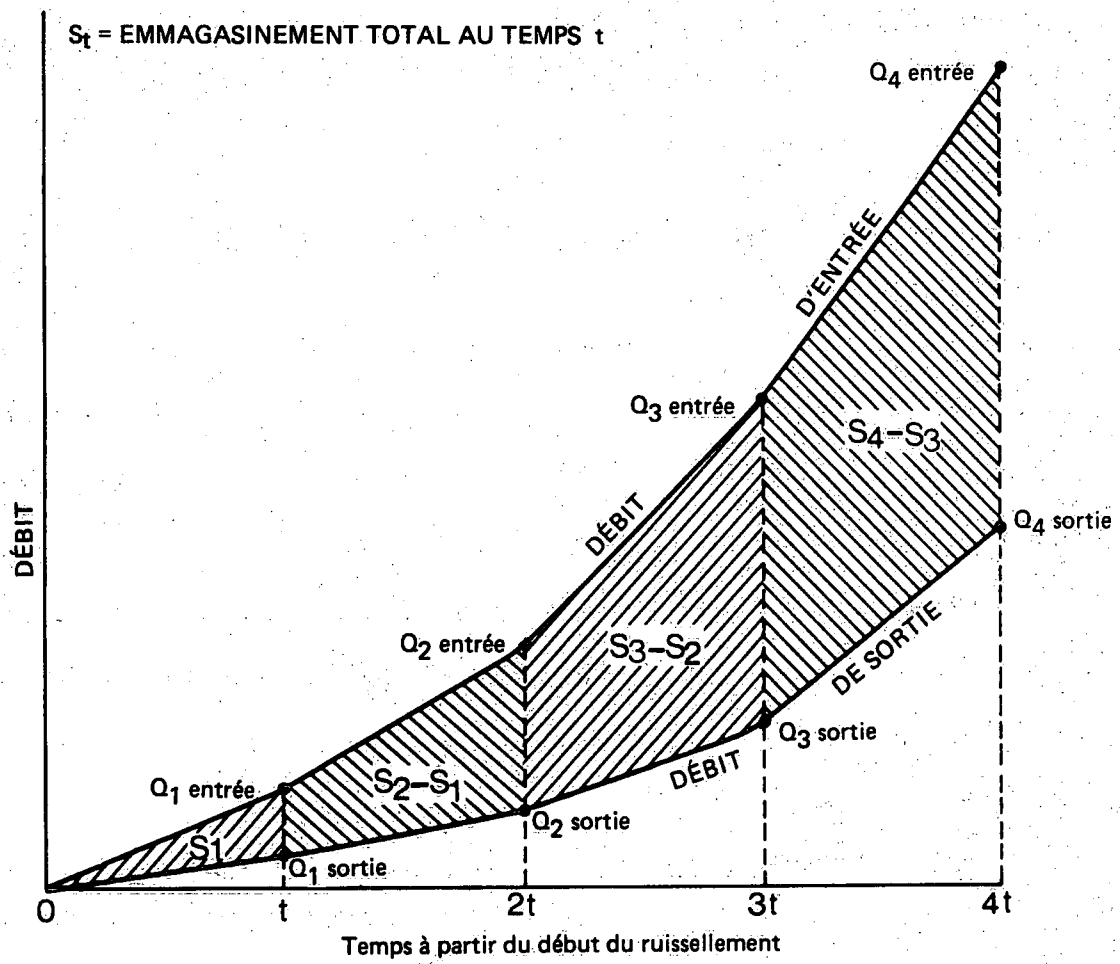


Figure 3. Schéma d'acheminement de l'emménagement

Pluviographes multiples - On a modifié la structure des données d'entrée pour tenir compte des pluviographes multiples. Chaque sous-surface de captation (c'est-à-dire, chaque tronçon) peut avoir son propre pluviographe. Cette caractéristique est particulièrement utile pour étudier les effets de la répartition spatiale de la pluie sur le ruissellement.

Entrée d'hydrogrammes d'admission - La schématisation de surfaces de captation étendues peut exiger plus que les 150 tronçons permis par le modèle ILLUDAS. Pour étudier des surfaces aussi étendues, il faudra peut-être d'abord les diviser en unités plus petites. Le ruissellement provenant du segment amont est alors considéré comme une entrée, sous forme d'hydrogrammes d'admission, dans les segments aval. Cette caractéristique permet de simuler le ruissellement provenant de surfaces de captation très étendues en effectuant des essais de simulation séquentiels.

Choix de paramètres d'infiltration du sol - Le modèle original permet à l'utilisateur de choisir entre quatre groupes différents de sols pour décrire les caractéristiques d'infiltration d'un sol particulier. La version modifiée permet à l'utilisateur de décrire l'infiltration du sol à l'aide des paramètres d'Horton  $f_0$ ,  $f_c$  et  $k$ , où  $f_0$  est le taux de filtration initiale,  $f_c$  est le taux d'infiltration finale et  $k$  est le taux d'affaiblissement.

Choix de calculs des temps d'admission - On a craint que le calcul ILLUDAS des temps d'admission sur les surfaces imperméables ne risque de donner des temps exagérément courts (3). C'est pourquoi on a inclus dans le modèle modifié une procédure de

calcul facultative, à savoir l'équation d'onde cinématique, dont la forme est la suivante:

$$T_i = \frac{0,93 L^{0,6} n^{0,6}}{S^{0,3}} \quad (4)$$

où  $T_i$  est le temps d'admission (min),  $L$  est la longueur de l'écoulement de surface ( $\pi$ ),  $n$  est le coefficient de rugosité de Manning, et  $S$  est la pente ( $\pi/\pi$ ) du plan de l'écoulement de surface.

En comparaison avec le modèle de calcul original, l'équation d'onde cinématique donne des temps plus longs pour les surfaces imperméables et plus courts pour les surfaces perméables. Comme on l'explique plus loin, l'utilisation de cette équation aboutit à des débits de pointe de ruissellement plus faibles.

Débit par temps sec (débit de base) - Quand on s'occupe de problèmes hydrauliques, il faut examiner le débit par temps sec. C'est pourquoi on a ajouté au modèle modifié une nouvelle option qui permet à l'utilisateur de spécifier le débit total par temps sec produit dans la surface de captation. Ce total est alors réparti entre les divers tronçons en proportion directe à la surface contributive de chaque tronçon.

Diamètre de calcul de l'égout - Dans la version originale, le diamètre du tuyau aval doit être égal ou supérieur à celui du tuyau amont. Cette contrainte a été retirée du mode de calcul hydraulique de la version modifiée. Du point de vue pratique, cette caractéristique peut être particulièrement utile si l'on ajoute l'emmagasinement au système.

Emmagasinement sur les chaussées - Dans l'analyse d'un système d'égouts existant (dénommée mode EVAL), les débits de ruissellement qui dépassent la capacité du tuyau sont emmagasinés sur la chaussée et ne retournent à l'égout que lorsqu'ils retombent en dessous de la capacité du tuyau. La version modifiée calcule la profondeur des nappes d'eau ainsi formées, pour une coupe transversale type de chaussée (fig. 4).

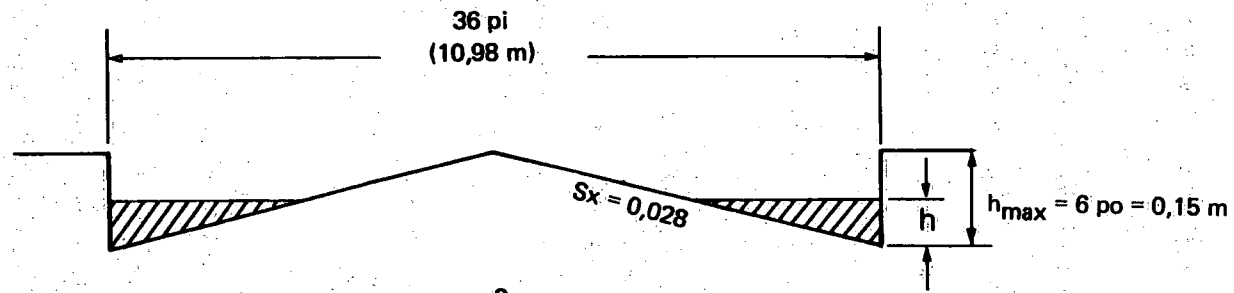
Analyse du débit sous pression - Une analyse approximative du débit en égout sous pression a été ajoutée à la version du modèle modifié. Dans cette analyse (dénommée mode GRAD), on permet au système de se surcharger, et on détermine le profil hydraulique correspondant. Bien que cette procédure ne soit pas très exacte, elle permet d'évaluer rapidement les conditions hydrauliques du système d'égouts analysé.

Comparaison des hydrogrammes simulés et observés - Un nouveau sous-programme qui sert à évaluer le degré de correspondance entre les hydrogrammes simulés et les hydrogrammes observés a été ajouté au modèle. On évalue le degré de correspondance en utilisant les six paramètres ci-après:

$$Q_{obs}/Q_{sim}, V_{obs}/V_{sim}, T_{obs}/T_{sim}, R, R_s, \text{ et EQI}$$

où Q est le débit de pointe de ruissellement, V est le volume de ruissellement, T est le temps jusqu'au débit de pointe de ruissellement, R est le coefficient de corrélation,  $R_s$  est le coefficient de corrélation spéciale, EQI est l'écart quadratique intégral, et les indices obs et sim signifient qu'il s'agit d'observations et de simulations, respectivement. Les définitions des paramètres statistiques R,  $R_s$  et EQI figurent en appendice.

COUPE TRANSVERSALE HYPOTHÉTIQUE DE CHAUSSÉE



VOLUME DE LA NAPPE D'EAU :  $V = 9 \pi^3 / \pi$  de la chaussée

LONGUEUR DE LA NAPPE D'EAU : PRENDRE LA PLUS GRANDE DES VALEURS CI-APRÈS :

- LONGUEUR DU TRONÇON ( $\pi$ )
- $170 \times$  SOUS-SURFACE DE CAPTATION (acres)

Figure 4. Emmagasinement de l'eau de ruissellement sur les chaussées

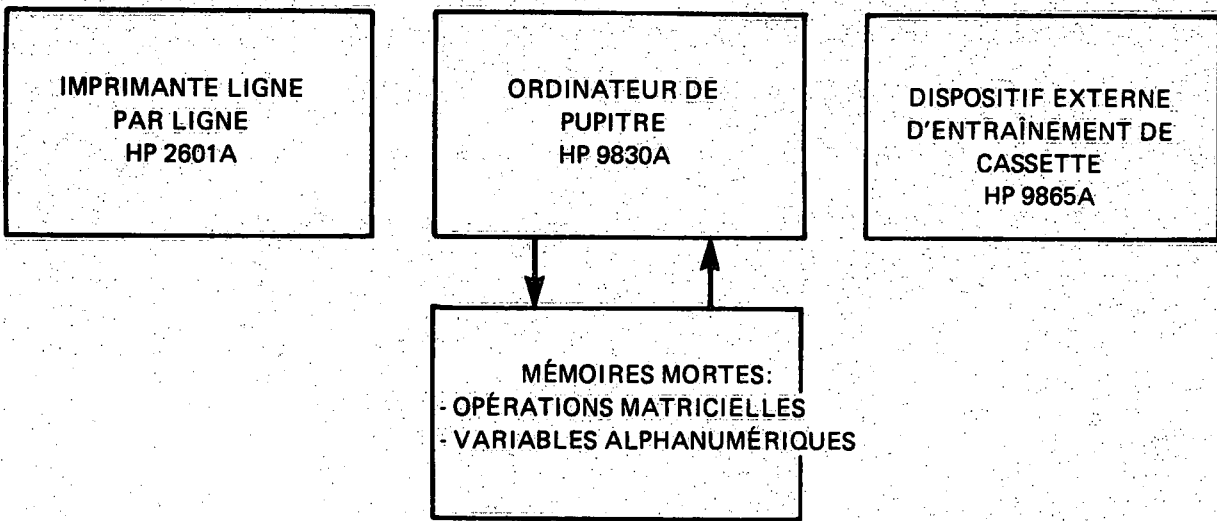
Présentation graphique des résultats - La sortie des résultats de la simulation a été complètement révisée par rapport au modèle original. On peut faire le tracé des hydrogrammes simulés et des hydrogrammes observés pour en faire une inspection visuelle rapide.

En résumé, les modifications exposées ci-dessus augmentent la versatilité du modèle ILLUDAS sans guère influencer sur les calculs de base du modèle original. Comme exception éventuelle à cette affirmation, on peut citer les deux calculs facultatifs suivants: temps d'admission obtenu à l'aide de l'équation d'onde cinématique, et analyse approximative du débit sous pression.

#### PROGRAMME ILLUDAS MODIFIÉ

La présente section donne une description générale du programme interactif de l'ILLUDAS modifié. Cette version particulière du modèle a été élaborée dans le langage-machine BASIC par les experts-conseil en ingénierie de BCPTA pour un ordinateur de pupitre particulier. Pour d'autres systèmes informatiques, il faudra peut-être apporter d'autres modifications au modèle. L'agent qui rédige le présent rapport n'a ni le mandat ni les moyens d'entreprendre ces modifications pour divers systèmes d'usager. Ce travail peut être effectué de façon efficace par des experts-conseil en informatique à des coûts relativement faibles.

Pour des raisons de brièveté, le listage de programmes n'a pas été reproduit dans le présent rapport. On peut obtenir gratuitement le listage de programmes du modèle ILLUDAS modifié ainsi que des descriptions de variables et d'exemples de passages en machine, à l'adresse suivante: Division de l'hydraulique, Institut national de recherche sur les eaux, P.O. Box 5050, Burlington (Ontario), L7R 4A6.



**SPÉCIFICATIONS**

**ORDINATEUR DE PUPITRE (CALCULATEUR PROGRAMMABLE)**

HP 9830A

**MÉMOIRE ÉLARGIE DE 16 K BYTES**

HP 11281A

**OPÉRATIONS MATRICIELLES - MÉMOIRE MORTE**

HP 11270B et OPTION 270

**VARIABLES ALPHANUMÉRIQUES - MÉMOIRE MORTE**

HP 11274B et OPTION 274

**DISPOSITIF EXTERNE D'ENTRAÎNEMENT DE CASSETTE**

HP 9865A

**IMPRIMANTE LIGNE PAR LIGNE**

HP 2607A

Figure 5. Système d'ordinateur de pupitre utilisé dans l'étude

## Description du matériel d'ordinateur

Le programme ILLUDAS modifié a été élaboré par BCPTA pour le système informatique illustré schématiquement à la figure 5. Le coeur du système est un ordinateur HP 9830. Les fichiers de programmes sont lus en séquence à l'aide d'un dispositif interne d'entraînement de cassette et chargés dans la mémoire du système, qui a été élargie à 16K bytes. Les manipulations alphanumériques sont effectuées par deux mémoires mortes externes illustrées à la figure 5. Dès qu'un fichier est chargé, il est exécuté de façon séquentielle. Une mémoire externe à cassette est utilisée pour charger ou stocker les données. Les résultats de la simulation sont imprimés sur une imprimante ligne par ligne à 132 caractères.

## Programme interactif

La version modifiée de l'ILLUDAS fonctionne en mode interactif. Le programme demande diverses données d'entrée qui sont introduites dans un format libre. Toute erreur de syntaxe est portée à l'attention de l'utilisateur. Les données d'entrée peuvent être imprimées et stockées sur bande. Dès que la vérification des données d'entrée est terminée, l'utilisateur cède les commandes à la partie simulation du programme. A la fin de la simulation, l'utilisateur reprend les commandes du programme. Les options disponibles à ce stade comprennent le stockage sur bande des hydrogrammes de ruissellement et une analyse statistique des hydrogrammes simulés et observés.



### Organigramme de programmation

Le modèle ILLUDAS original (1974) contenait quelque 1100 instructions Fortran et nécessitait 220K bytes de tores magnétiques sur ordinateur IBM 360/75 (5). Pour adapter ce modèle à un ordinateur de pupitre, il fallait le remanier dans une très large mesure. Le programme a été complètement réécrit dans le langage BASIC et divisé en 23 fichiers pouvant être chargés et exécutés séquentiellement. La version modifiée finale contient plus de 1500 instructions.

L'organigramme du programme ILLUDAS modifié est illustré à la figure 6.

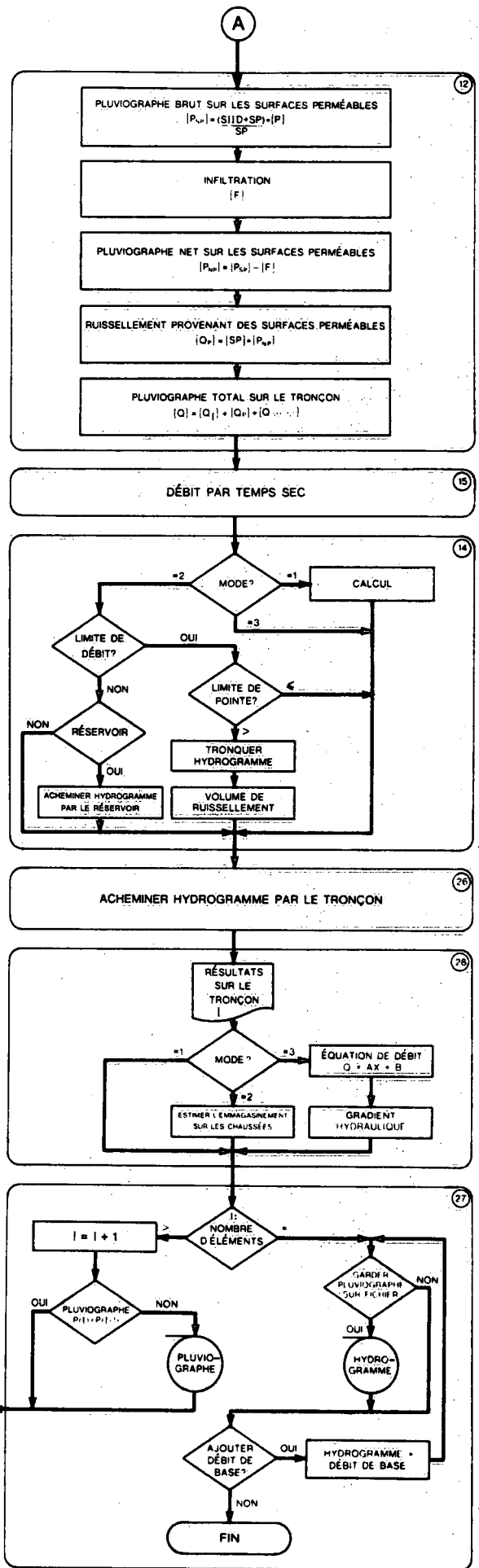
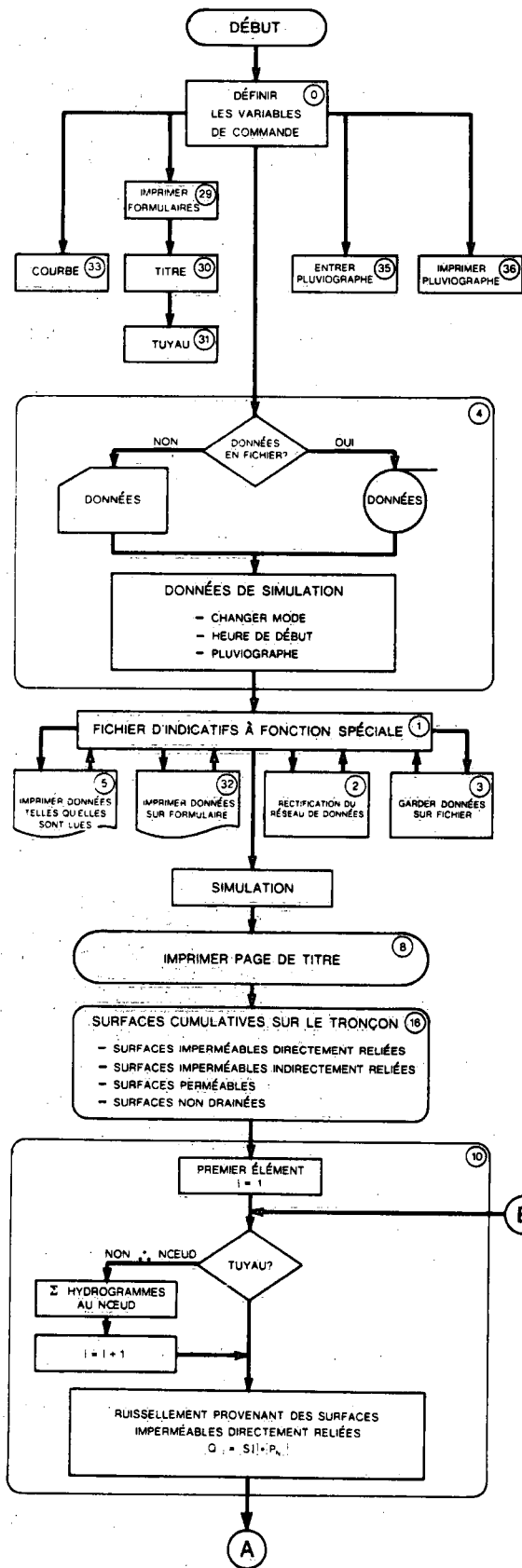
### VERIFICATION DU MODELE ILLUDAS MODIFIE

L'un des objectifs de l'étude était de vérifier la version modifiée "ordinateur de pupitre" du modèle ILLUDAS sur une surface de captation urbaine au Canada. On a choisi la surface de captation de Malvern, à l'étude depuis plusieurs années. On disposait en outre de résultats de simulation obtenus pour cette surface sur le SWMM (Storm Water Management Model), résultats qui pouvaient servir de mesure d'appréciation des résultats obtenus sur le modèle ILLUDAS modifié.

### Description de la surface de captation d'essai

La surface de captation urbaine de Malvern est un quartier résidentiel moderne situé à Burlington (Ontario). On en étudie le ruissellement depuis plusieurs années. Les références 1 et 2 donnent les résultats de cette étude et les caractéristiques détaillées de cette surface. On trouvera ci-dessous une brève description de la surface de captation.

Figure 6. Organigramme du modèle ILLUDAS modifié (Réf. 3)



La surface de captation de Malvern a une superficie de 23,3 ha (57,6 acres), dont 7,88 ha (19,5 acres) sont imperméables. La surface est en pente douce ( $s = 0,01$ ) dans le sens nord-est - sud-ouest, mais les pentes locales dépendent du nivellement des parcelles. Le sol peut être décrit comme un limon sablonneux bien drainé. Le tableau 2 donne un résumé des caractéristiques de la surface, et le tableau 3 donne des estimations des paramètres hydrologiques pertinents utilisés dans des études antérieures.

Cette surface de captation est desservie par un réseau ramifié convergent d'égouts pluviaux. Le tableau 4 donne la liste des caractéristiques de base de ce réseau. Les égouts sont faits de tuyaux en béton dont la rugosité a été caractérisée par le coefficient de rugosité de Manning  $n = 0,013$ .

#### Données pluviométriques et de ruissellement utilisées pour la vérification

Pour vérifier le modèle ILLUDAS modifié, on a sélectionné 12 cas, dont les caractéristiques apparaissent au tableau 5.

Il faut souligner que tous les cas de vérification ont une fréquence assez élevée, le cas le plus marqué ayant produit une pointe de ruissellement avec période de récurrence d'environ un an.

En moyenne, les averses de vérification ont produit environ 16 mm (0,63 po) de pluie et ont duré un peu plus de quatre heures. La hauteur moyenne de pluie pour les cinq jours précédents s'élevait à environ 16 mm (0,63 po).

#### Simulations du ruissellement sur l'ILLUDAS modifié

Les cas de pluie/ruissellement choisis ont été reproduits, pour la surface de captation de Malvern, par la version modifiée de l'ILLUDAS qui a été exécutée sur un calculateur programmable Hewlett-Packard HP9830 (16K bytes). On trouvera les détails de ces simulations ci-dessous.

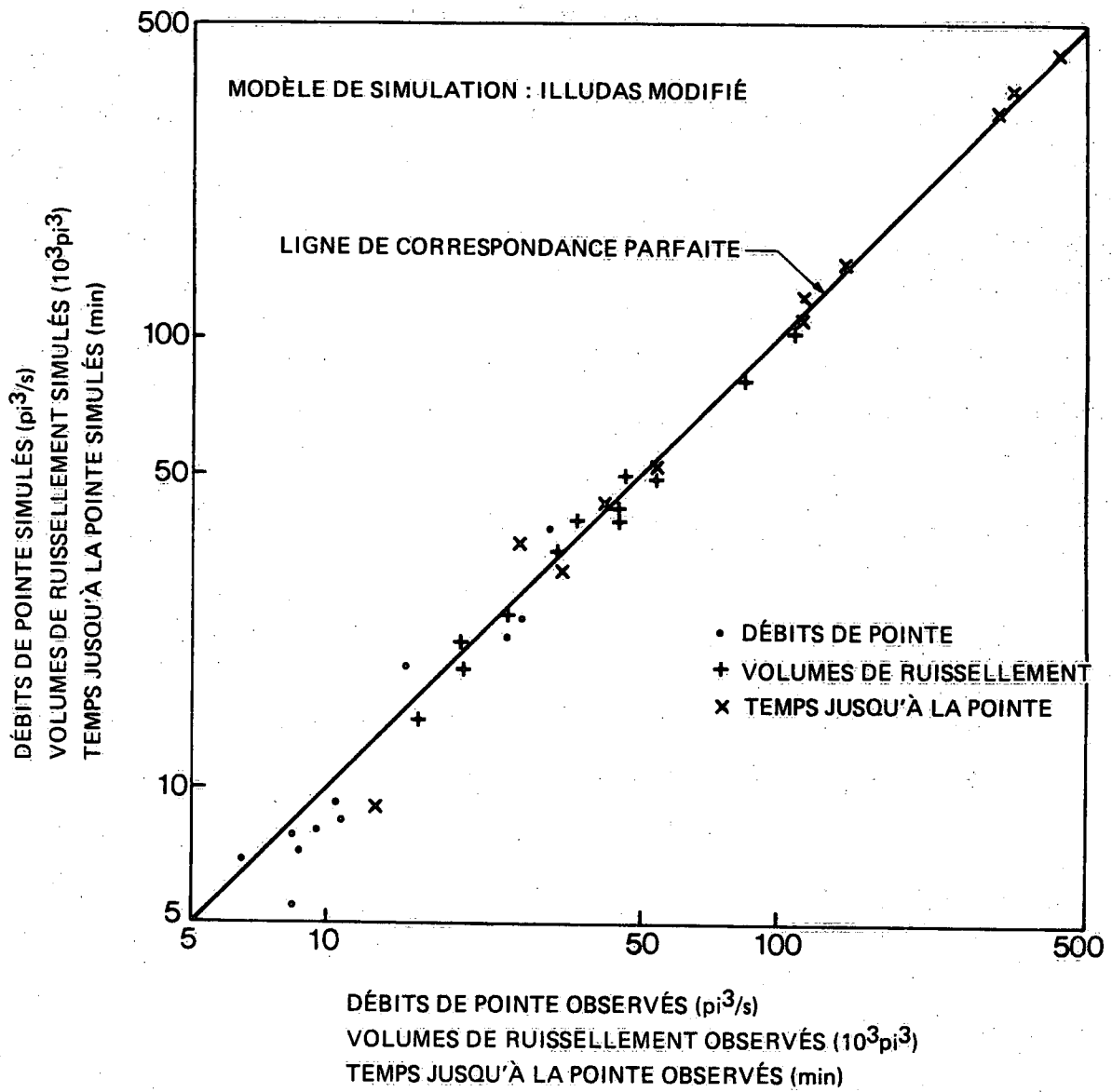


Figure 7. Paramètres des hydrogrammes de ruissellement observés et simulés

On a subdivisé la surface de captation de Malvern en 40 sous-surfaces drainées par 40 tuyaux d'égout. Le tableau 6 donne les caractéristiques de ces sous-surfaces.

On a déterminé les temps d'admission sur les surfaces perméables et imperméables à l'aide des procédures du modèle ILLUDAS original. Pour les surfaces imperméables, les temps d'admission s'échelonnaient de 2,5 à 3,3 minutes. Pour les surfaces perméables, le calcul s'est limité aux jardins avant, étant donné la faible probabilité que les jardins arrière produisent un ruissellement quelconque dans le cadre des averses étudiées. Le temps moyen d'admission pour les jardins avant était de 16,8 minutes.

Les résultats des simulations de ruissellement sont donnés au tableau 7 et présentés sous forme de graphique à la figure 7. Nous passons ensuite à l'analyse des résultats de la vérification.

Les débits de pointe de ruissellement simulés étaient en moyenne inférieurs d'environ 11 pour cent aux mêmes débits observés, avec un coefficient de variation de 19 pour cent. Cette excellente correspondance est à peu près la même que celle signalée antérieurement pour les autres modèles de ruissellement (1, 2). L'écart entre les résultats simulés et les résultats observés était dû en grande partie aux mauvais résultats enregistrés dans deux cas de faible intensité pluviale. Abstraction faite de ces deux cas, l'erreur moyenne obtenue pour les pointes simulées se réduisait à 5 pour cent. Il faut savoir que les écarts entre les résultats simulés et les résultats observés sont causés non seulement par la déviation propre à la modélisation, mais aussi par des erreurs concernant la précipitation et le ruissellement observés. Ces erreurs ont peut-être contribué aux mauvais résultats obtenus pour les deux cas analysés ici.

Il faut noter aussi que, si les débits de pointe observés représentent des débits instantanés, les débits de pointe simulés sont mis en moyenne sur l'échelon temps de calcul. Les débits de pointe simulés tendent donc naturellement à sous-estimer les pointes observées.

Les volumes de ruissellement simulés étaient d'environ six pour cent inférieurs aux débits observés. Le coefficient de variation, par rapport à la moyenne, du rapport  $V_{obs}/V_{sim}$  était de 7,5 pour cent. Il se peut que cette sous-estimation ait été influencée par une surestimation des pertes sur les surfaces imperméables. Il convient de noter qu'une possibilité de captation insuffisante du pluviomètre de la surface de captation contribuerait aussi à réduire les volumes simulés de ruissellement.

Les temps jusqu'aux pointes de ruissellement ont été simulés avec une assez bonne précision. En moyenne, la différence entre les temps simulés et les temps observés était inférieure à une minute, et l'écart type était d'environ six minutes.

Les paramètres statistiques recommandés par Sarma, Delleur et Rao (4) pour l'évaluation du degré de correspondance des hydrogrammes simulés et des hydrogrammes observés ont également été étudiés. Dans ce but, on a d'abord ajusté les temps des hydrogrammes observés pour réduire au minimum l'écart quadratique intégral. Les modifications résultantes des temps sont caractérisées par un glissement moyen de temps de 0,83 minute et par un écart type de six minutes. Après cet ajustement, la correspondance de l'ensemble des hydrogrammes simulés et observés a été qualifiée de bonne à très bonne.

On a tenté, sans succès, d'améliorer les résultats de la simulation en tenant compte des conditions d'humidité antérieure. Cela s'explique par le fait que ces considérations n'influent que sur le ruissellement provenant de surfaces perméables, qui n'a guère contribué au ruissellement de la surface de captation.

Enfin, deux limitations influent sur les résultats de la vérification: le nombre relativement faible de cas et leur fréquence assez élevée. Dans aucun des cas choisis, les surfaces perméables n'ont contribué appréciablement au ruissellement total de la surface de captation.

## COMPARAISON DES SIMULATIONS ILLUDAS ET SWMM

### POUR LA SURFACE DE CAPTATION DE MALVERN

On peut pousser plus loin l'évaluation des résultats de la simulation obtenus pour la surface de captation de Malvern sur le modèle ILLUDAS modifié en les comparant avec les résultats obtenus antérieurement sur le modèle SWMM (tableau 8). Cette comparaison est particulièrement intéressante car le SWMM est peut-être le modèle de ruissellement urbain le plus largement accepté et appliqué. Il ne faut pas exagérer l'importance de cette comparaison, car le modèle SWMM, dans son ensemble, a une portée beaucoup plus étendue que le modèle ILLUDAS; toutefois, il y a des applications pratiques dans lesquelles la version "ordinateur de pupitre" de l'ILLUDAS peut très bien remplacer un modèle beaucoup plus complexe.

En moyenne, les pointes de ruissellement simulées par l'ILLUDAS étaient inférieures d'environ 3,7 pour cent aux pointes simulées par le SWMM. De même, les volumes de ruissellement produits par l'ILLUDAS étaient d'environ 1,6 pour cent plus faibles. En examinant ces différences plus avant, on a constaté qu'elles étaient statistiquement négligeables (niveau de confiance de 95 pour cent).

Les temps jusqu'aux pointes de ruissellement simulés par l'ILLUDAS et le SWMM étaient pratiquement identiques.

On peut donc conclure que pour une situation simple de ruissellement provenant de surfaces imperméables et pour un écoulement à surface libre dans un réseau d'égouts convergents, le modèle ILLUDAS modifié a produit des résultats presque identiques à ceux obtenus à l'aide du Bloc de ruissellement du modèle SWMM.

## ANALYSE DE LA SENSIBILITE DU MODELE ILLUDAS MODIFIE

On a mené une analyse expérimentale de la sensibilité du modèle ILLUDAS modifié pour la surface de captation de Malvern. Dans cette analyse, on a fait varier les paramètres d'entrée choisis sur un grand éventail de valeurs et on a étudié les effets de ces variations sur les sorties du modèle. Ce type d'information est utile pour les usagers du modèle car il indique les paramètres d'entrée qui influent grandement sur les résultats de la modélisation et qui devraient par conséquent être spécifiés très précisément. On peut se contenter d'évaluer approximativement les autres paramètres.

On a étudié en particulier les facteurs ci-après influant sur les simulations ILLUDAS:

Entrée de données

pluviométriques de

calcul

- période de récurrence
- durée de l'averse
- répartition dans le temps des intensités pluviales
- échelon temps

Paramètres hydro-

logiques et

hydrauliques

- perte initiale
- humidité antérieure et infiltration
- temps d'admission
- rugosité des tuyaux

Techniques de

simulation

- représentation discrète de la surface de captation
- mode de simulation



Le tableau 9 donne les valeurs numériques des paramètres d'entrée et la description des diverses techniques de simulation utilisées dans l'analyse de la sensibilité. Ce tableau donne aussi la liste des meilleures évaluations des paramètres d'entrée utilisés dans une simulation de référence. Les résultats de l'analyse de la sensibilité suivent.

#### Entrée de données pluviométriques de calcul

Le choix d'une entrée de données pluviométriques de calcul (averse nominale) est une question qui semble controversée. Une bonne part des critiques de la façon d'aborder l'averse nominale se fondent sur l'hypothèse fondamentale que les périodes de récurrence d'un cas d'averse et du ruissellement résultant sont les mêmes. On a aussi critiqué les définitions quelque peu arbitraires des paramètres des averses nominales. L'objectif de la présente analyse n'est pas d'examiner les principes de base des averses nominales, mais simplement de décrire les effets des variations des paramètres des averses nominales sur les résultats de la simulation.

L'averse nominale utilisée dans la présente étude est celle qui a été élaborée par Mitci (3) pour Montréal.

Période de récurrence - Le drainage des quartiers résidentiels est typiquement conçu pour des cas dont les périodes de récurrence vont de 2 à 10 ans; on a donc utilisé la même période dans l'analyse de la sensibilité. La période de récurrence de 5 ans a été prise comme valeur de référence.

Le tableau 10 donne les résultats de la simulation obtenus pour diverses périodes de récurrence. On constate qu'en faisant passer la période de récurrence de 2 à 10 ans, on obtient une augmentation de 40 à 50 pour cent des débits de pointe de ruissellement comme des volumes de ruissellement.

Durée de l'averse - Le choix de la durée de l'averse nominale est assez arbitraire. Dans la présente étude, la durée de l'averse a varié de 0,5 à environ trois heures. Pour l'averse nominale employée ici, la durée de l'averse n'influe pas sur l'intensité pluviale maximale mais elle influe sur la précipitation totale.

Le tableau 11 résume les résultats de la simulation obtenus pour une averse d'une période de récurrence de 5 ans avec des durées variant de 0,5 à 3 heures. Il est intéressant de noter que, si les pointes simulées n'ont pas été influencées par la durée de l'averse, les volumes de ruissellement simulés ont augmenté avec la durée de l'averse. Le coefficient volumétrique de ruissellement est toutefois resté constant.

Répartition dans le temps des intensités pluviales - La répartition des intensités pendant une averse nominale est typiquement décrite par deux paramètres: une fonction de répartition souvent calculée à partir des courbes d'intensité-durée-fréquence (IDF) de l'averse, et le moment relatif de l'intensité de pointe. La répartition de l'intensité utilisée ici est celle qui a été élaborée par Mitci (3) et peut être décrite pour l'averse de référence comme suit:

$$i = \frac{86}{t+12} \quad (5)$$

où  $i$  est l'intensité pluviale (po/h) et  $t$  est le temps (min) mesuré avant et après la pointe d'intensité. Par conséquent, pour calculer la répartition de l'intensité d'une averse nominale d'une période de récurrence et d'une durée particulières, le concepteur choisit d'abord le moment de la pointe d'intensité, puis calcule les intensités à divers moments avant et après la pointe.

Aux fins de la présente étude, on a examiné quatre moments différents de la pointe d'intensité. Ces moments sont décrits par le rapport  $t_p/T$ , où  $t_p$  est le temps jusqu'à la pointe et  $T$  est la durée de l'averse. Les quatre répartitions utilisées peuvent être décrites comme suit:

Répartition intégralement avancée	( $t_p/T = 0,03$ )
Répartition avancée	( $t_p/T = 0,26$ )
Répartition centrée	( $t_p/T = 0,52$ ) - référence
Répartition retardée	( $t_p/T = 0,77$ )

Le tableau 12 donne la liste des pointes et volumes de ruissellement simulés pour diverses répartitions de l'intensité. On a constaté que les pointes et volumes les plus faibles correspondaient à la répartition intégralement avancée, où l'intensité de pointe coïncide avec un maximum de pertes causées par une infiltration élevée et par le remplissage du volume d'emmagasinement à la surface. Les débits de pointe augmentaient à mesure qu'augmentaient les valeurs de  $t_p/T$ . Le pourcentage d'augmentation des débits de pointe diminuait pour les valeurs de  $t_p/T$  supérieures à 0,5. La différence totale entre les débits de pointe des répartitions intégralement avancées et ceux des répartitions retardées n'était que de 20 pour cent.

Les volumes totaux de ruissellement simulés se sont révélés peu sensibles à la répartition des intensités. La différence entre les volumes de ruissellement simulés correspondant aux répartitions intégralement avancées et aux répartitions retardées n'était que de 6 pour cent. On a enregistré des résultats nettement différents pour les volumes de ruissellement provenant des parties perméables de la surface de captation. Le volume simulé correspondant à la répartition intégralement avancée ne s'élevait qu'à la moitié environ de celui correspondant à la répartition retardée.

Echelon temps - Les entrées de données pluviométriques font l'objet d'une représentation discrète sous forme de courts intervalles de temps qui dans le cas du modèle ILLUDAS sont identiques à l'échelon temps de calcul utilisé en simulation. Le manuel ILLUDAS (5) donne certains éléments d'orientation sur le choix de l'échelon temps. Celui-ci doit être aussi court que le permet la qualité des données pluviométriques, l'idéal étant qu'il représente la moitié ou le tiers du temps moyen d'admission sur les surfaces revêtues.

Dans l'analyse de la sensibilité, on a fait varier l'échelon temps de 1 à 30 minutes. Le tableau 13 donne les résultats de toutes les simulations.

Les débits de pointe simulés étaient assez sensibles à la longueur de l'échelon temps. Les deux échelons les plus courts, équivalant à 1 et 2 minutes, répondaient aux critères de choix de l'échelon temps et ont donné des résultats pratiquement analogues. En augmentant davantage les intervalles, on a fortement réduit les débits de pointe simulés et obtenu des résultats peu réalistes.

Les volumes de ruissellement simulés n'ont guère été touchés par la longueur de l'échelon temps (voir tableau 13). Les effets de l'échelon temps sur les temps simulés jusqu'à la pointe étaient aussi assez faibles.

#### Paramètres hydrologiques et hydrauliques

Les quatre paramètres ci-après sont examinés dans la présente section: perte initiale à soustraire, infiltration du sol dans le cadre de diverses conditions d'humidité antérieure, temps d'admission, et rugosité des tuyaux d'égout. Les deux premiers paramètres influent sur le calcul des pertes dans la surface de captation, et les deux derniers influent alors sur le cours à la surface ainsi que dans les égouts.

Perte initiale à soustraire - La perte initiale à soustraire varie en fonction de la surface de captation. Pour les surfaces imperméables, la perte variait de 0 à 6 mm (0 à 0,25 po). Pour les surfaces perméables, la perte variait de 0 à 12 mm (0 à 0,5 po). Le tableau 14 donne les débits de pointe et volumes obtenus en simulant diverses pertes initiales. On peut déduire du tableau 14 que les débits de pointe simulés n'ont guère été touchés par des variations même importantes de la perte initiale. Il ne faut cependant pas perdre de vue que ces résultats correspondent à la répartition centrée et que l'on pourrait obtenir des résultats différents, par exemple pour la répartition intégralement avancée.

Les volumes de ruissellement simulés étaient plus sensibles à la perte initiale à soustraire (voir tableau 14). La variation des volumes de ruissellement simulés s'est élevée à environ 27 pour cent. L'importance de cette variation s'explique par le fait qu'on réduit l'excédent de pluie en proportion directe à la perte initiale.

Infiltration et conditions d'humidité antérieure - L'infiltration et les conditions d'humidité antérieure ont été examinées ensemble. Au total, on a examiné 20 combinaisons possibles de groupes de sols et de conditions d'humidité antérieure. Cet ensemble de 20 simulations a été reproduit dans trois cas différents: une averse d'une période de récurrence de 5 ans (l'averse de référence), une averse d'une période de récurrence de 10 ans, et enfin, des jardins arrière reliés directement à la rue. Les tableaux 15 à 17 donnent les résultats de toutes les simulations. L'analyse des résultats commence par les débits de pointe et se poursuit par les volumes de ruissellement.

Le tableau 15 résume les résultats des simulations des pointes de ruissellement pour l'averse d'une période de récurrence de 5 ans et le drainage de captation existant. Il est intéressant de noter que, même en fonction d'une forte variation du type de sol et des conditions d'humidité antérieure, les débits de pointe de ruissellement n'ont guère varié. La pointe la plus faible représentait 92 pour cent

de la valeur de référence, et la pointe la plus élevée, 117 pour cent. Pour tout sol particulier, les variations du débit de pointe dues aux variations des conditions d'humidité antérieure n'ont pas dépassé 24 pour cent. De même, pour toute condition d'humidité antérieure, les variations du débit de pointe pour divers sols n'ont pas dépassé 19 pour cent. En groupant tous les 20 débits de pointe de cet ensemble, on a pu les caractériser par une moyenne de 1,02 (de la pointe de référence) et par un écart type de 0,08.

On a effectué la même analyse sur une averse d'une période de récurrence de 10 ans (tableau 16), avec des résultats analogues. La variation des débits de pointe simulés pour divers groupes de sols et conditions d'humidité a très peu augmenté. Pour l'ensemble des 20 débits de pointe, la moyenne était égale à 1,01 fois le débit de pointe de référence, et l'écart type était égal à 0,10.

Il était quelque peu surprenant que les pointes de ruissellement simulées ne soient pas sensibles à l'infiltration et à l'humidité antérieure. Un examen plus approfondi de la configuration de drainage de la surface de captation a révélé que seuls les jardins avant contribuaient effectivement au ruissellement total. Le ruissellement provenant des jardins arrière est beaucoup trop retardé pour contribuer effectivement au ruissellement de pointe de la surface de captation. En conséquence, la surface de captation qui contribue effectivement au débit de pointe n'est que de 11,4 ha (surface imperméable + jardins avant), et cette surface est imperméable à 71 pour cent. C'est pourquoi les modifications de l'infiltration ne touchent le ruissellement que de 29 pour cent de la surface effective, et qu'elles ont un effet limité sur le total du ruissellement de la surface de captation.

On pourrait s'attendre à ce que les pointes de ruissellement provenant de surfaces de captation comprenant des surfaces contributives perméables plus étendues soient plus sensibles aux changements de l'infiltration du sol. Afin d'approfondir la question, on a fait porter la dernière série de simulations sur une surface de captation hypothétique. Cette surface était identique à tous points de vue à la

surface de captation de Malvern, sauf pour le drainage des jardins arrière, directement reliés à la rue. Ainsi, l'ensemble de la surface perméable (15,45 ha, soit 66 pour cent de la surface de captation tout entière) contribuait effectivement au ruissellement de la surface de captation. Les résultats des simulations concernant la surface hypothétique sont donnés au tableau 17; ils indiquent que les débits de pointe sont très sensibles aux caractéristiques du sol ainsi qu'aux conditions d'humidité antérieure. Pour un groupe de sols particuliers et diverses conditions d'humidité antérieure, les variations du débit de pointe sont passées à 60 pour cent. De même, pour des conditions particulières d'humidité antérieure et divers sols, les variations du débit de pointe sont passées à 55 pour cent.

On a constaté que les volumes de ruissellement n'étaient que légèrement plus sensibles que les débits de pointe à l'infiltration du sol. Pour l'averse d'une période de récurrence de 5 ans et le drainage de la surface de captation existante, les variations des volumes de ruissellement dues à divers groupes de sols et conditions d'humidité antérieure étaient de 32 pour cent. Les résultats obtenus pour l'averse d'une période de récurrence de 10 ans étaient pratiquement identiques. Comme on l'a mentionné au sujet des débits de pointe, la partie de la surface de captation qui contribue effectivement au ruissellement total est très imperméable, et une proportion de 83 à 100 pour cent du ruissellement total provient des surfaces imperméables. Les variations du ruissellement provenant de la surface perméable ont donc un effet limité sur le ruissellement total.

Enfin, on a étudié le cas hypothétique dans lequel les jardins arrière sont drainés directement vers la rue (voir tableau 17). Comme prévu, on a enregistré des variations beaucoup plus grandes des volumes de ruissellement. En fait, les volumes de ruissellement variaient d'un facteur de 2,7.

Temps d'admission - Le temps d'admission est un paramètre assez important qui détermine la vitesse de ruissellement sur les surfaces de captation. Dans l'analyse de la sensibilité, on a examiné deux façons de calculer les temps d'admission, à savoir les expressions incorporées dans le modèle original et l'équation d'onde cinématique (équation 4).

Dans le modèle ILLUDAS original, le temps d'admission  $T_i$  est calculé à partir des expressions suivantes:

$$\text{Surface imperméable} \quad T_i = \frac{Ln}{(1,486 \times 0,2^{2/3} \times S^{1/2}) \times 60} + 2 \quad (6)$$

$$\text{Surface perméable} \quad T_i = 1,0214 \frac{L^{0,4}}{S^{0,333}} \quad (7)$$

où  $T_i$  est le temps d'admission,  $L$  est la longueur de l'écoulement de surface (pi),  $S$  est la pente de la trajectoire parcourue (pi/pi), et  $n$  est le coefficient de rugosité de Manning.

Les cinq ensembles ci-après de valeurs de temps d'admission ont été utilisés dans les simulations:

$$0,1 T_i; 0,3 T_i; T_i; 3 T_i; T_i \text{ eoc}$$

où les quatre premiers temps ont été calculés à partir des équations 6 et 7 (c'est-à-dire la méthode ILLUDAS originale), et le dernier temps,  $T_i \text{ eoc}$ , correspond à l'équation d'onde cinématique (équation 4). Il est intéressant de noter que, pour les surfaces imperméables, le temps moyen d'admission  $T_i \text{ eoc}$  était environ deux fois plus long que le temps moyen calculé à partir de l'équation 6.



Le tableau 18 donne la liste des résultats des simulations de ruissellement pour divers temps d'admission. Les pointes de ruissellement ont varié considérablement avec les variations des temps d'admission. En faisant passer le temps d'admission  $T_i$  de  $0,1 T_i$  à  $3 T_i$ , on a réduit les pointes de ruissellement d'un facteur de deux. L'équation d'onde cinématique a produit une pointe de ruissellement inférieure d'environ 20 pour cent à celle correspondant aux calculs du modèle original.

Les variations des temps d'admission n'ont aucunement influé sur les volumes de ruissellement (voir tableau 18).

Rugosité des tuyaux - La rugosité des tuyaux influe sur le cours dans les égouts. Dans l'analyse de la sensibilité, on a fait varier la rugosité en trois échelons:  $n=0,010$ ,  $0,013$ , et  $0,015$ . Le tableau 19 donne les résultats des simulations pour diverses valeurs de rugosité des tuyaux.

Les effets de la rugosité des tuyaux sur les débits de pointe simulés étaient assez faibles. En fait, en faisant passer la rugosité des tuyaux de  $0,010$  à  $0,015$ , on n'a fait diminuer la pointe du ruissellement total que de 3,6 pour cent. Bien que la pointe du ruissellement total n'ait guère changé, des modifications plus importantes pourraient intervenir pour des surfaces de captation et des tuyaux d'égout particuliers. On a donc exécuté le modèle dans le mode de calcul, et examiné les modifications des dimensions des tuyaux commerciaux résultant des modifications de la rugosité des tuyaux. En réduisant la rugosité de  $0,013$  à  $0,010$  et en utilisant les dimensions des tuyaux commerciaux, on a donné à 10 tronçons sur 15 des diamètres plus étroits. En faisant passer  $n$  de  $0,013$  à  $0,015$ , on a obtenu une augmentation de quatre dimensions de tuyaux. Il semble que, si les modifications de la rugosité des tuyaux n'influent guère sur le débit de pointe de la surface de captation, il se peut qu'elles aient une certaine importance économique à la suite d'un certain nombre de modifications des diamètres particuliers des tuyaux.

## Techniques de simulation

Dans cette catégorie, on a examiné deux aspects de simulation: le niveau de représentation discrète de la surface de captation et le mode de simulation. Le premier aspect dépend dans une large mesure du jugement de l'utilisateur du modèle, et le second découle alors des exigences d'une application particulière du modèle.

Niveau de représentation discrète - La représentation discrète est définie ici comme la subdivision de la surface de captation en un certain nombre de sous-surfaces, à chacune desquelles correspond un tuyau d'égout pour le drainage. Dans l'analyse de la sensibilité, on a utilisé quatre niveaux différents de représentation discrète:

1, 5, 15 et 40 sous-surfaces de captation/tuyaux.

A l'aide des niveaux de représentation discrète ci-dessus, on a effectué des simulations de ruissellement pour l'averse d'une période de récurrence de 5 ans, pour l'averse d'une période de récurrence de 10 ans, et pour les 12 cas réels utilisés dans l'étude de vérification. Les résultats de ces simulations sont résumés aux tableaux 20 et 21.

Comme prévu, les débits de pointe ont diminué à mesure que diminuait le nombre de sous-surfaces de captation. Une réduction du nombre de sous-surfaces de 40 à 1 s'est traduite par une réduction des débits de pointe de 10 et de 16 pour cent pour les averses d'une période de récurrence de 10 et de 5 ans, respectivement. Dans le cas des averses de vérification, les débits de pointe ont baissé de 3 pour cent. Pour les averses de vérification à faible intensité produisant des pointes de ruissellement de moins de  $0,015 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ha}$ , les différences entre les pointes de ruissellement simulées pour 1 et 40 surfaces étaient négligeables.

## Mode de simulation

Comme on l'a mentionné plus haut, le modèle ILLUDAS modifié peut être exécuté en trois modes: le mode de calcul, le mode d'analyse et le mode de surcharge. Dans le mode de calcul, le modèle choisit le diamètre nécessaire pour qu'un tuyau puisse évacuer les débits qu'il reçoit. Dans le mode d'analyse, les débits qui dépassent la capacité du tuyau sont emmagasinés à l'extérieur du système et y rentrent lorsqu'ils retombent en-dessous de la capacité du tuyau. Le mode de surcharge nouvellement ajouté tente de faire une approximation du débit sous pression en calculant les hauteurs du profil hydraulique nécessaires pour évacuer les débits qui dépassent la capacité du tuyau rempli.

Le modèle a été exécuté dans tous les trois modes pour les averses nominales d'une période de récurrence de 5 et de 10 ans. Les résultats figurent au tableau 22.

Les résultats obtenus dans le mode d'analyse ne présentent guère d'intérêt, car le débit de pointe est déterminé par la capacité de l'exutoire ( $Q=49 \text{ pi}^3/\text{s}=1,392 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les deux autres modes ont donné des résultats plus intéressants. Le cours approximatif en surcharge a accéléré le ruissellement et produit des pointes supérieures de 10 à 16 pour cent à celles obtenues dans le mode de calcul (c'est-à-dire un écoulement à surface libre).

## SOMMAIRE ET CONCLUSIONS

On a modifié une version normalisée du modèle ILLUDAS pour la faire fonctionner en mode interactif sur un ordinateur de pupitre HP 9830 (mémoire de 16K bytes) avec des dispositifs périphériques. La version du modèle modifié conserve non seulement toutes les caractéristiques du modèle original (version 1974), mais elle est élargie en vue d'un certain nombre de nouvelles caractéristiques. Ces nouvelles caractéristiques comprennent le fonctionnement en mode interactif, les pluviographes

multiples, l'entrée d'hydrogrammes provenant des tronçons supérieurs, le calcul facultatif des temps d'admission à partir d'une équation d'onde cinématique, l'emmagasinement des eaux d'écoulement sur les chaussées, l'analyse approximative du débit sous pression dans les égouts, le débit par temps sec, et l'analyse statistique d'hydrogrammes simulés et observés.

Le modèle ILLUDAS modifié a été vérifié sur la surface de captation de Malvern, avec de bons résultats. La plupart des cas de vérification représentaient des averses moyennes à fréquence assez élevée. En moyenne, les pointes et volumes de ruissellement simulés étaient d'environ 10 et 5 pour cent inférieurs aux pointes et volumes de ruissellement observés, respectivement. Quant aux temps jusqu'au débit de pointe, les temps simulés correspondaient d'assez près aux temps observés.

Les résultats de la vérification obtenus sur le modèle ILLUDAS modifié ont été comparés avec les résultats obtenus antérieurement sur le Bloc de ruissellement du modèle SWMM. Bien que ce dernier ait reproduit les données de Malvern légèrement mieux que ne l'a fait le modèle ILLUDAS, la différence était statistiquement négligeable. On peut conclure que, sur une petite surface de captation urbaine dont le ruissellement est déterminé par la surface imperméable et par un cours à surface libre dans des égouts, le modèle ILLUDAS a fonctionné aussi bien que le Bloc de ruissellement du modèle SWMM.

Une analyse de la sensibilité du modèle ILLUDAS modifié a été entreprise pour la surface de captation étudiée. Cette analyse portait sur les effets des caractéristiques de l'averse nominale, des paramètres hydrologiques et hydrauliques, et des techniques de simulation, sur les hydrogrammes simulés.

Les pointes et les volumes de ruissellement ont considérablement augmenté en fonction de l'augmentation de la période de récurrence de l'averse nominale. Les pointes de ruissellement n'ont pratiquement pas été touchées par la durée de l'averse, par les échelons temps plus courts que le temps moyen d'admission sur les surfaces revêtues, ni par les répartitions de l'intensité où la pointe se produit.

après le premier quart de l'averse. Les échelons temps plus longs que le temps moyen d'admission pour les surfaces imperméables et les répartitions de l'intensité où la pointe se produit dans le premier quart de l'averse se sont traduits par une réduction des débits de pointe. Les volumes de ruissellement ont augmenté considérablement en fonction de l'augmentation de la durée de l'averse et du retard de la pointe d'intensité, mais ils n'ont pas été touchés par l'échelon temps.

Les paramètres hydrologiques et hydrauliques comprenaient la perte initiale à soustraire, l'infiltration et l'humidité antérieure, les temps d'admission et la rugosité des tuyaux.

La perte initiale n'a guère influé sur les débits de pointe, mais elle a eu un effet plus prononcé sur les volumes de ruissellement. Pour la surface de captation étudiée, les effets de l'infiltration du sol et des conditions d'humidité antérieure sur les pointes et volumes de ruissellement ont été peu prononcées. Pour une gamme complète de conditions d'humidité antérieure et les groupes de sols étudiés, l'écart des débits de pointe et volumes simulés par rapport à la moyenne pouvait être caractérisé par des coefficients de variation de 8 et 12 pour cent, respectivement. Les valeurs moyennes s'écartaient au maximum de 2 pour cent des valeurs obtenues pour les conditions de référence (c'est-à-dire les meilleures estimations des paramètres). Il convient de souligner que la configuration de la surface de captation est telle que le ruissellement provenant des jardins arrière est plutôt retardé et ne contribue guère au ruissellement de la surface de captation. Le reste de la partie contributive de la surface de captation est hautement perméable et le ruissellement qui en provient n'est donc guère touché par les variations de l'infiltration du sol. Dans un cas hypothétique, le ruissellement provenant des jardins arrière a été acheminé directement vers les rues. Le débit de pointe moyen pour tous les sols et conditions d'humidité antérieure dépassait de 5 pour cent la pointe de référence, et le coefficient de variation est passé à 20 pour cent.

L'effet sur les volumes de ruissellement était plus important encore. Le volume moyen représentait 1,12 fois le volume de référence, et le coefficient de variation était de 39 pour cent.

Les variations des temps d'admission ont influé sur les pointes de ruissellement, mais non sur les volumes de ruissellement. Le calcul facultatif des temps d'admission à partir de l'équation d'onde cinématique s'est traduit par des débits de pointe d'environ 20 pour cent inférieurs à ceux qui avaient été calculés à l'aide de la procédure originale.

Les variations de la rugosité des tuyaux n'ont guère influé sur la pointe de ruissellement de la surface de captation, mais se sont traduites par un certain nombre de modifications des dimensions des tuyaux de certains tronçons. Il semble que le choix de la rugosité des tuyaux puisse avoir une certaine incidence sur les coûts du drainage.

Parmi les techniques de simulation, on a étudié les effets de la représentation discrète de la surface de captation et du mode de simulation sur les hydrogrammes de ruissellement. Les pointes de ruissellement ont légèrement diminué en fonction de la diminution du nombre de sous-surfaces de captation. Les volumes de ruissellement sont restés inchangés.

Parmi les modes de simulation, on a obtenu les débits de pointe les plus élevés dans le mode de débit sous pression, suivi du mode de calcul. Le mode d'analyse limitait les débits de pointe à la capacité de l'exutoire.

La dernière section décrit le matériel d'ordinateur utilisé dans la présente étude ainsi que l'organigramme de programmation dans les figures 5 et 6 respectivement. Un listing de programmes complet peut être obtenu sur demande auprès de la Division de l'hydraulique de l'Institut national de recherche sur les eaux.

En résumé, les simulations du ruissellement pour de petites surfaces de captation urbaines et un cours à surface libre peuvent être accomplies sur un petit ordinateur de pupitre avec des résultats tout à fait comparables à ceux que l'on obtient sur des modèles beaucoup plus complexes exigeant l'utilisation d'ordinateurs puissants.

#### REFERENCES

1. Marsalek, J., 1977. Malvern urban test catchment, Volume I. Research Report No. 57, Canada-Ontario Agreement Research Program, Ottawa.
2. Marsalek, J., 1979. Malvern urban test catchment, Volume II. Research Report No. 95, Canada-Ontario Agreement Research Program, Ottawa.
3. Patry, G. and L. Raymond, 1979. ILLUDAS model study. A draft report submitted by Bessette, Crevier, Parent, Tanguay and Associates to the Department of Supply and Services, Ottawa, October.
4. Sarma, P.B., J.W. Delleur and A.R. Rao, 1968. An evaluation of rainfall-runoff models for small urbanized watersheds. Water Resources Research Center, Purdue University, Lafayette, Indiana.
5. Terstriep, M.L. and J.B. Stall, 1974. The Illinois urban drainage area simulator, ILLUDAS. Bulletin No. 58, Illinois State Water Survey, Urbana, Illinois.

TABLEAUX



Tableau 1. Conditions d'humidité antérieure des surfaces perméables (4)

Numéro ILLUDAS	Description	Hauteur totale de pluie pendant les cinq jours précédant l'averse (po)
1	Sec à l'absolu	0
2	Assez sec	0 à 0,5
3	Assez humide	0,5 à 1,0
4	Saturé	plus de 1,0

Tableau 2. Surface de captation de Malvern - Caractéristiques

Éléments de surface	Superficie				Pourcentage de la surface de captation
	Surface impermeable		Surface perméable		
	(acres)	(ha)	(acres)	(ha)	
Jardins arrière	-	-	30,10	12,18	52,2
Jardins avant	-	-	8,00	3,24	13,9
Allées	3,10	1,25	-	-	5,4
Toits	8,10	3,28	-	-	14,1
Trottoirs	1,62	0,66	-	-	2,8
Chaussées	6,68	2,70	-	-	11,6
Total	19,50	7,89	38,10	15,42	100,0

Tableau 3. Surface de captation de Malvern - Evaluation des paramètres utilisés dans les études antérieures

Paramètre	Surface perméable	Surface imperméable
Pente du terrain ( $p_i/p_i$ )	0,03	0,03
Longueur de l'écoulement de surface ( $p_i$ )	143,3	143,3
n de Manning pour l'écoulement de surface	0,25	0,013
Emmagasinement dans les dépressions du sol ( $p_o$ )	0,184	0,020
Paramètres d'infiltration de Horton		
$f_o$ (po/h)	3,00	-
$f_c$ (po/h)	0,52	-
k (sec <sup>-1</sup> )	0,00115	-

Tableau 4. Surface de captation de Malvern - Egouts pluviaux

Tuyau	Nombre de drains alimentant le tuyau	Diamètre du tuyau (po)	Longueur du tuyau (pi)	Pente du radier (%)
1	2	12	295	0,80
2	3	15	220	0,70
3	4	18	225	0,50
4	8	18	300	0,50
5	6	12	149	0,50
6	7	12	210	0,80
7	8	12	213	1,30
8	9	18	151	1,00
9	12	18	148	1,32
10	11	12	266	0,80
11	12	15	260	0,80
12	17	21	187	1,20
13	14	12	132	0,50
14	15	15	291	0,50
15	16	15	292	0,50
16	17	18	298	0,50
17	21	24	242	1,00
18	19	12	229	0,50
19	20	12	156	1,50
20	21	21	304	2,00
21	22	27	192	1,20
22	24	27	192	1,20
23	24	10	140	1,50
24	25	27	161	0,90
25	40	30	396	0,50
26	27	12	268	0,90
27	28	15	300	1,00
28	30	18	301	0,68
29	30	10	160	1,20
30	31	18	224	1,20
31	33	18	296	1,56
32	33	10	88	0,60
33	34	27	273	0,24
34	35	27	273	0,24
35	39	27	194	0,20
36	37	12	247	0,70
37	38	12	172	2,00
38	39	12	238	2,36
39	40	27	280	0,42
40	Exutoire	33	176	0,86

Tableau 5. Caractéristiques des cas de vérification

Numéro du cas	Date jour/mois/an	Précipitation totale		Durée de l'averse (h)	Précipitation enregistrée pendant les cinq jours antérieurs (po)	Indice d'humidité antérieure (mm)	Intensité maximale temporaire (po/h)	Intensité maximale temporaire (mm/h)	
		(mm)	(mm)						
1	22/09/73	18	0,71	2,30	0,75	19	3	2,10	53
2	23/09/73	9	0,36	2,17	1,02	26	4	1,65	42
3	13/10/73	8	0,31	2,63	0,00	0	1	0,60	15
4	28/10/73	29	1,16	11,08	0,13	3	2	0,30	8
5	29/10/73	38	1,43	11,83	1,66	42	4	0,48	12
6	14/11/73	15	0,60	9,83	0,00	0	1	0,54	14
7	15/11/73	18	0,71	4,33	0,64	16	3	0,36	9
8	28/11/73	12	0,47	4,08	0,48	12	2	0,54	14
9	31/05/74	16	0,63	0,68	1,40	36	4	3,48	88
10	04/07/74	6	0,24	0,27	0,89	23	3	2,76	70
11	28/09/74	16	0,63	1,52	0,08	2	2	2,03	52
12	20/11/74	8	0,30	2,37	0,59	15	3	0,60	15
Moyenne		16	0,63	4,43	0,65	16	2,7	1,29	32,7

Tableau 6. Surface de captation de Malvern - Représentation discrète pour les simulations ILLUDAS (Données de 1973, réf. 3)

Numéro de la sous-surface de captation	Surface totale	Surfaces imperméables directement reliées	Surface perméable contribuante*	Longueur maximale du parcours sur les surfaces imperméables
	(acres)	(acres)	(acres)	(pi)
1	1,47	0,50	0,20	248
2	1,82	0,62	0,25	308
3	1,56	0,53	0,22	272
4	1,56	0,54	0,21	312
5	0,63	0,22	0,09	175
6	0,92	0,33	0,12	230
7	1,08	0,39	0,15	262
8	1,69	0,60	0,23	276
9	0,76	0,27	0,10	200
10	1,11	0,47	0,13	283
11	1,25	0,53	0,15	313
12	1,44	0,59	0,18	274
13	1,20	0,56	0,13	286
14	1,07	0,50	0,12	262
15	1,48	0,69	0,17	342
16	1,50	0,70	0,17	345
17	1,93	0,77	0,24	317
18	1,27	0,39	0,18	265
19	1,14	0,35	0,17	243
20	1,37	0,42	0,20	280
21	2,23	0,72	0,32	298
22	1,29	0,46	0,17	242
23	0,45	0,16	0,06	120
24	1,37	0,54	0,17	227
25	1,07	0,54	0,11	329
26	1,64	0,47	0,25	284
27	1,99	0,57	0,30	334
28	2,10	0,60	0,30	351
29	0,56	0,16	0,08	130
30	2,40	0,69	0,36	313
31	1,67	0,51	0,24	310
32	0,69	0,22	0,10	164
33	1,98	0,63	0,28	335
34	1,65	0,53	0,24	323
35	1,41	0,45	0,20	284
36	1,88	0,43	0,30	324
37	1,44	0,33	0,23	260
38	1,41	0,33	0,23	255
39	2,45	0,57	0,40	309
40	1,72	0,61	0,23	248

\*Jardins avant

Tableau 7. Résultats de la vérification obtenus sur le modèle ILLUDAS modifié  
(données de base provenant de la réf. 3)

Numéro du cas	Débits de pointe			Volumes de ruissellement			Temps jusqu'à la pointe		
	$Q_{obs}$ ( $\pi^3/s$ )	$Q_{sim}$ ( $\pi^3/s$ )	$\frac{Q_{obs}}{Q_{sim}}$	$V_{obs}$ ( $\pi^3$ )	$V_{sim}$ ( $\pi^3$ )	$\frac{V_{obs}}{V_{sim}}$	$T_{obs}$ (min)	$T_{sim}$ (min)	$\frac{T_{obs}}{T_{sim}}$ (min)
1	32,40	33,5	0,97	54 600	48 343	1,13	42	42	0
2	25,26	21,5	1,17	25 400	23 770	1,07	117	122	- 5
3	8,45	7,9	1,07	19 900	20 288	0,98	112	110	+ 2
4	8,52	5,4	1,58	86 100	79 969	1,08	316	310	+ 6
5	10,86	8,5	1,28	110 300	102 411	1,08	437	425	+12
6	10,47	9,3	1,13	44 200	40 667	1,09	344	355	-11
7	6,47	6,9	0,94	46 100	48 398	0,95	142	145	- 3
8	9,54	8,1	1,18	32 800	33 732	0,97	27	35	- 8
9	31,82	37,4	0,85	44,717	39,011	1,15	34	30	+ 4
10	27,21	23,4	1,16	15 925	14 023	1,14	13	9	+ 4
11	15,11	18,5	0,82	36 183	39 316	0,92	13	9	+ 4
12	8,81	7,1	1,24	20 283	17 955	1,13	54	52	+ 2
Moyenne	16,24	15,63	1,12	44 709	42 324	1,06	137,6	137,0	0,6
Ecart type	9,93	11,11	0,21	28 193	25 975	0,08	146,3	145,3	6,4
Coefficient de variation %	61,15	71,08	18,75	63,06	61,37	7,55	106,32	106,06	-

Tableau 8. Comparaison des résultats de la vérification obtenus sur les modèles ILLUDAS et SWM (données de base provenant de la réf. 3)

Numéro du cas	Débits de pointe			Volumes de ruissellement			Temps jusqu'à la pointe		
	$Q_{I*}$ ( $\text{pi}^3/\text{s}$ )	$Q_{S**}$ ( $\text{pi}^3/\text{s}$ )	$Q_S/Q_I$	$V_I$ ( $\text{pi}^3$ )	$V_S$ ( $\text{pi}^3$ )	$V_S/V_I$	T (min)	$T_S$ (min)	$T_S - T_I$ (min)
1	33,5	34,50	1,0299	48 343	49 500	1,0239	42	40	- 2
2	21,5	22,40	1,0419	23 770	24 400	1,0265	122	122	0
3	7,9	8,30	1,0506	20 288	20 900	1,0302	110	110	0
4	5,4	5,40	1,0000	79 969	80 200	1,0029	310	321	+11
5	8,5	8,80	1,0353	102 411	103 700	1,0126	425	412	-13
6	9,3	9,40	1,0108	40 667	41 400	1,0180	355	354	- 1
7	6,9	6,90	1,0000	48 398	49 200	1,0166	145	148	+ 3
8	8,1	9,60	1,1852	33 732	32 800	0,9724	35	44	+ 9
9	37,4	38,66	1,0337	39 011	39 629	1,0158	30	28	- 2
10	23,4	23,51	1,0047	14 023	14 418	1,0282	9	9	0
11	18,5	18,55	1,0027	39 316	39 901	1,0149	9	9	0
12	7,1	7,47	1,0521	17 955	18 470	1,0287	52	54	+ 2
Moyenne	15,63	16,12	1,04	42 324	42 877	1,02	137,00	137,58	0,58
Ecart type	11,11	11,37	0,05	25 975	26 163	0,02	145,32	143,73	5,95
Coefficient de variation %	71,08	70,53	4,87	61,37	61,02	1,56	106,07	104,47	-

\* L'indice I renvoie au modèle ILLUDAS

\*\*L'indice S renvoie au modèle SWM (Bloc de ruissellement)

Tableau 9. Analyse de la sensibilité - Variations des paramètres d'entrée

Paramètre	Simulation de référence			Variations	
<u>Entrée de données pluviométriques de calcul</u>					
Période de récurrence (années)	5	2	10		
Durée (h)	1	0,5	3		
Répartition de l'intensité $t_p/T^*$	0,52	0,03	0,26	0,77	
Echelon temps (min)	2	1	5	10	30
<u>Paramètres hydrologiques et hydrauliques</u>					
Perte initiale à soustraire (po)					
- surfaces imperméables		0,02	0	0,1	0,25
- surfaces perméables	0,184	0	0,2	0,50	
Courbe d'infiltration du sol (selon le groupe de sols)	SWM†	A	B	C	D
Conditions d'humidité antérieure	1	2	3	4	
Temps d'admission	$T_i$	$0,1T_i$	$0,3T_i$	$3T_i$	$T_{EOC}$
Rugosité des tuyaux d'égout (n de Manning)	0,013	0,010	0,015		
<u>Techniques de simulation</u>					
Niveau de représentation discrète (nombre d'éléments)	15	1	5	40	
Mode de simulation	1	2	3		
	(calcul)	(analyse)	(débit sous pression)		

\*Répartition générale d'après Mitci (3)

†Infiltration du sol décrite par les données du tableau 3



Tableau 10. Sensibilité des pointes et des volumes de ruissellement à la période de récurrence de l'averse

Période de récurrence de l'averse (années)	Débit de pointe de ruissellement		Volume de ruissellement	
	( $\text{pi}^3/\text{s}$ )	(%)	( $\text{pi}^3$ )	(%)
2	66,6	79	67 200	77
5	84,5	100	87 600	100
10	100,5	119	111 900	128

Tableau 11. Sensibilité des paramètres des hydrogrammes de ruissellement à la durée de l'averse

Durée de l'averse (heures)	Débit de pointe de ruissellement		Volume de ruissellement		Coefficient volumétrique de ruissellement
	( $\text{pi}^3/\text{s}$ )	(%)	( $\text{pi}^3$ )	(%)	
0,50	83,9	99	74 600	85	0,35
1,03	84,5	100	87 600	100	0,35
3,03	85,5	101	98 200	112	0,35

Tableau 12. Sensibilité des pointes et volumes de ruissellement à l'intensité de pointe

Moment relatif de l'intensité de pointe $t_p/T$	Débit de pointe de ruissellement		Volume de ruissellement		Volume de ruissellement provenant des surfaces perméables	
	( $\text{pi}^3/\text{s}$ )	(%)	( $\text{pi}^3$ )	(%)	( $\text{pi}^3$ )	(%)
0,03	69,5	82	83 800	96	7 900	68
0,26	80,3	95	85 800	98	9 800	85
0,52	84,5	100	87 600	100	11 600	100
0,77	85,8	102	89 000	102	13 100	122

Tableau 13. Sensibilité des paramètres des hydrogrammes de ruissellement à l'échelon temps de simulation

Echelon temps  (min)	Débit de pointe de ruissellement		Volume de ruissellement		Décalage dans le temps = Temps jusqu'à la pointe - Temps jusqu'à l'intensité de pointe  (min)
	( $\text{pi}^3/\text{s}$ )	(%)	( $\text{pi}^3$ )	(%)	
1	85,5	101	87 400	100	4
2	84,5	100	87 600	100	4
5	78,1	92	88 300	101	5
10	60,3	71	89 600	102	0
30	35,6	42	95 700	109	0

Tableau 14. Sensibilité des pointes et volumes de ruissellement à la perte initiale à soustraire

Perte initiale à soustraire			Débit de pointe de ruissellement		Volume de ruissellement	
Surface imperméable (po)	Surface perméable (po)	Moyenne pondérée (po)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)
0,00	0,00	0,00	89,0	105	94 200	108
0,02	0,184	0,07	84,5	100	87 600	100
0,10	0,20	0,13	84,2	100	82 000	94
0,25	0,50	0,32	78,0	92	63 800	73

Tableau 15. Débits de pointe de ruissellement et volumes de ruissellement en fonction des éléments suivants: divers sols et conditions d'humidité antérieure, averse d'une période de récurrence de 5 ans, surfaces perméables drainées - jardins avant

Indice d'humidité antérieure	1		2		3		4	
Courbe d'infiltration des sols	Débit de pointe		Débit de pointe		Débit de pointe		Débit de pointe	
	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)
SWMM	84,5	100	89,8	106	93,5	111	93,5	111
A	77,6	92	77,6	92	81,3	96	86,7	103
B	77,6	92	77,7	92	83,8	99	88,5	105
C	77,9	92	82,3	97	88,4	105	96,3	114
D	83,2	98	87,7	104	97,1	115	98,5	117

	Volume de ruissellement		Volume de ruissellement		Volume de ruissellement		Volume de ruissellement	
	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)
SWMM	87 600	100	97 100	100	98 900	113	98 900	113
A	76 000	87	76 000	87	80 700	92	90 400	103
B	76 000	87	76 200	87	84 900	97	94 000	107
C	76 500	87	83 100	95	94 300	108	104 500	119
D	84 100	96	92 900	106	107 100	122	109 300	125

Tableau 16. Débits de pointe de ruissellement et volumes de ruissellement en fonction des éléments suivants: divers sols et conditions d'humidité antérieure, averse d'une période de récurrence de 10 ans, surfaces perméables drainées - jardins avant

Indice d'humidité antérieure	1		2		3		4	
	Débit de pointe		Débit de pointe		Débit de pointe		Débit de pointe	
Courbe d'infiltration des sols	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)
	SWM	92,2	100	100,7	109	102,2	111	102,2
A	79,5	86	79,6	86	86,5	94	95,9	104
B	79,5	86	81,3	88	90,5	98	98,6	107
C	82,0	89	88,6	96	98,7	107	105,1	114
D	89,4	97	97,5	106	105,8	115	106,9	116
	<u>Volume de ruissellement</u>		<u>Volume de ruissellement</u>		<u>Volume de ruissellement</u>		<u>Volume de ruissellement</u>	
	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)
SWM	111 900	100	122 000	109	123 900	111	124 000	111
A	93 000	83	93 100	83	102 000	91	113 700	102
B	93 000	83	95 000	85	107 800	96	118 400	106
C	96 100	86	105 500	94	119 300	107	130 500	117
D	107 000	96	117 900	105	132 900	119	135 200	121

Tableau 17. Débits de pointe de ruissellement et volumes de ruissellement en fonction des éléments suivants: divers sols et conditions d'humidité antérieure, averse d'une période de récurrence de 5 ans, surfaces perméables drainées - jardins avant

Indice d'humidité antérieure	1		2		3		4	
Courbe d'infiltration des sols	Débit de pointe		Débit de pointe		Débit de pointe		Débit de pointe	
	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)
SWMM	93,2	100	109,1	117	115,0	123	115,0	123
A	77,6	83	77,6	83	81,4	87	100,9	108
B	77,6	83	77,6	83	88,4	95	105,6	113
C	77,6	83	84,7	91	105,2	113	123,8	133
D	86,3	93	102,1	110	126,1	135	133,6	143

	Volume de ruissellement		Volume de ruissellement		Volume de ruissellement		Volume de ruissellement	
	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)
SWMM	110 600	100	153 400	139	161 900	146	162 000	146
A	76 000	69	76 000	69	83 800	76	125 100	113
B	76 000	69	76 000	69	101 000	91	139 700	126
C	76 000	69	92 600	84	140 500	127	186 300	168
D	96 800	87	133 600	121	198 100	179	208 600	189

Tableau 18. Sensibilité des pointes et volumes de ruissellement à la procédure de calcul du temps d'admission

Calcul du temps d'admission	Débit de pointe de ruissellement		Volume de ruissellement	
	( $\pi^3/s$ )	(%)	( $\pi^3$ )	(%)
0,1 $T_i$	115,9	137	87 600	100
0,3 $T_i$	94,2	111	87 612	100
$T_i^*$	84,5	100	87 612	100
$T_{iECC}^\dagger$	69,5	82	87 616	100
3 $T_i$	57,0	67	87 619	100

\* $T_i$  = Temps d'admission calculé par le modèle ILLUDAS original

† $T_{iECC}$  = Temps d'admission calculé à partir de l'équation d'onde cinématique

Tableau 19. Sensibilité des pointes de ruissellement à la rugosité des tuyaux

Rugosité des tuyaux d'égout (n de Manning)	Averse d'une période de récurrence de 5 ans			Averse d'une période de récurrence de 10 ans		
	Débit de pointe		Nombre de modifications des diamètres des tuyaux commerciaux*	Débit de pointe		Nombre de modifications des diamètres des tuyaux commerciaux*
( $\pi^3/s$ )	(%)	( $\pi^3/s$ )		(%)		
0,010	87,1	103,1	-10	91,8	99,0	-12
0,013	84,5	100,0	0	92,8	100,0	0
0,015	84,1	99,5	+ 4	92,0	99,1	+ 2

\*le signe + indique les augmentations des diamètres (d'un incrément)  
le signe - indique les réductions

**Tableau 20. Sensibilité des pointes et des volumes de ruissellement au détail de la représentation discrète des surfaces de captation - averse d'une période de récurrence de 5 ans**

Nombre de sous-surfaces de captation (tuyaux)	Débit de pointe		Volume de ruissellement	
	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	(pi <sup>3</sup> )	(%)
1	72,8	84	87 624	100
5	77,5	89	87 622	100
15	84,5	97,5	87 612	100
40	87,6	100	87 527	100



Tableau 21. Sensibilité des pointes et des volumes de ruissellement au détail de la représentation discrète de la surface de captation - Cas de vérification

Cas n°	Débits de pointe (pi <sup>3</sup> /s)			Volumes de ruissellement (pi <sup>3</sup> )		
	Q <sub>40</sub> *	Q <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub> /Q <sub>40</sub>	V <sub>40</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> /V <sub>40</sub>
1	33,5	28,5	0,85	48 300	48 500	1,00
2	21,5	18,4	0,86	23 800	23 900	1,00
3	7,9	7,9	1,00	20 800	20 300	0,98
4	5,4	5,7	1,06	80 000	80 000	1,00
5	8,5	8,9	1,05	102 400	102 000	1,00
6	9,3	9,7	1,04	40 700	40 700	1,00
7	6,9	7,0	1,01	48 400	48 400	1,00
8	8,1	9,6	1,18	33 700	33 700	1,00
9	37,4	30,1	0,81	39 000	39 100	1,00
10	23,4	18,8	0,80	14 000	14 100	1,01
11	18,5	17,0	0,92	339 300	39 400	1,00
12	7,1	7,4	1,04	18 000	18 000	1,00
Moyenne	15,6	14,1	0,97	42 400	42 400	1,00
Ecart type	11,1	8,4	0,12	25 900	26 000	0,008
Coefficient de variation	71,1	59,6	12,4	61,1	61,3	0,8

\*L'indice indique le nombre de sous-surfaces de captation

Tableau 22. Débits de pointe et temps jusqu'à la pointe pour divers modes de simulation

Mode de simulation	Averse d'une période de récurrence de 5 ans			Averse d'une période de récurrence de 10 ans		
	Débit de pointe		Temps jusqu'à la pointe (min)	Débit de pointe		Temps jusqu'à la pointe (min)
	(pi <sup>3</sup> /s)	(%)		(pi <sup>3</sup> /s)	(%)	
1 - Calcul	84,5	100	36	92,2	100	40
2 - Analyse	49,0	58	34-36	49,0	53	35-55
3 - Débit sous pression	89,3	106	34	107,0	116	35

APPENDICE

MESURES STATISTIQUES (Réf. 4)

En admettant une relation linéaire entre deux variables, la variable observée  $O$  et la variable calculée  $C$ , le coefficient de corrélation linéaire  $R$  se définit comme suit:

$$R = \frac{N \left( \sum_{i=1}^N O_i C_i \right) - \left( \sum_{i=1}^N O_i \right) \left( \sum_{i=1}^N C_i \right)}{\left\{ \left[ N \left( \sum_{i=1}^N O_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right] \left[ N \left( \sum_{i=1}^N C_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^N C_i \right)^2 \right] \right\}^{1/2}}$$

où  $N$  est le nombre d'observations de  $O$  et de  $C$ . Plus la valeur de  $R$  se rapproche de  $+1$  ou  $-1$ , mieux les deux variables concordent.

Le coefficient de corrélation spéciale  $R_s$  se définit comme suit:

$$R_s = \frac{2 \sum_{i=1}^N O_i C_i - \sum_{i=1}^N C_i^2}{\sum_{i=1}^N O_i^2}$$

Plus la valeur de  $R_s$  se rapproche de  $+1$ , mieux les variables observées et calculées concordent.

Enfin, l'écart quadratique intégral (EQI) se définit comme suit:

$$EQI = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^N O_i^2} \cdot 100$$

Plus la valeur de EQI est faible, mieux les variables observées et calculées concordent.

Les valeurs numériques des mesures statistiques sont évaluées qualitativement comme suit:

R	RS	EQI	
$0,99 < R < 1,0$	$0,99 < RS < 1,0$	$0\% < EQI < 3,0\%$	excellent
$0,95 < R < 0,99$	$0,95 < RS < 0,99$	$3,0\% < EQI < 6,0\%$	très bon
$0,90 < R < 0,95$	$0,90 < RS < 0,95$	$6,0\% < EQI < 10,0\%$	bon
$0,85 < R < 0,90$	$0,85 < RS < 0,90$	$10,0\% < EQI < 25,0\%$	passable
$0,00 < R < 0,85$	$0,00 < RS < 0,85$	$25,0\% < EQI$	médiocre

Environment Canada Library, Burlington



3 9055 1017 3312 8