

**Institut Français de Recherche Scientifique
pour le Développement en Coopération**

Centre de Lomé

Section Hydrologie

**EXTRAPOLATION DE MESURES PONCTUELLES
DE RUISSELLEMENT A L'ECHELLE D'UN
VERSANT HOMOGENE**

**Proposition de 2 approches différentes du
problème :**

- 1- Modèle de ruissellement à stockage de surface
- 2- Dispositif de recyclage du ruissellement sur parcelle

**J.-C. BADER
Mars 1990**

Sommaire

Introduction

1ère partie

I - Recherche d'un modèle simple à stockage de surface

- 1) Approche théorique qualitative
- 2) Analyse de mesures de terrain
 - a) présentation des données utilisées
 - b) interprétation des mesures et résultats obtenus
- 3) Le modèle analogique du déversoir percé
 - a) présentation du modèle
 - b) équation décrivant le fonctionnement hydraulique du modèle

II - Calage du modèle sur les mesures de terrain

- 1) Méthode employée
 - a) reconstitution d'un limnigramme $q_r(t)$ avec le modèle
 - b) calcul des paramètres S , N et H_L du modèle
- 2) Résultats obtenus
- 3) Variations du paramètre S avec l'état d'humectation du sol

III - Conclusion sur le modèle du déversoir percé

- 1) Résumé de la méthode
- 2) Tentative d'interprétation physique des 4 paramètres du modèle
- 3) Remarques sur $H - H_L$
- 4) Remarques sur la phase d'imbibition
- 5) Conclusion

IV - Passage de l'échelle du mètre carré à l'échelle d'un versant

1) Hypothèses essentielles

2) Extrapolation du modèle du déversoir percé

a) hypothèse

b) méthode d'extrapolation du modèle

c) résultats obtenus pour une averse d'intensité constante

d) résultats obtenus pour des averses à intensité variable

e) conclusion

2ème partie

I - Justification d'un recyclage du ruissellement

II - Le dispositif de recyclage du ruissellement

1) Principe

2) Dimensionnement

a) principe

b) calcul de e et m

c) dimensions retenues

3) Fonctionnement

4) Essais du dispositif

III - Premiers essais de terrain

1) Procédure d'installation

2) Résultats obtenus

IV - Conclusion

Bibliographie

- Annexe 1 - Résultats obtenus pendant la campagne de simulation de pluie sur le bassin de la Daye à Dzogbégan.
- Annexe 2 - Linnigrammes du ruissellement recueilli à l'aval des parcelles de 1 m x 1 m du bassin de la Daye. Comparaison des résultats de la modélisation avec les valeurs mesurées.
- Annexe 3 - Extrapolation du modèle. Linnigrammes du ruissellement obtenu à l'aval de parcelles de 1 mètre de large et de longueur variable.
- Annexe 4 - Calcul de stabilité de la cuve flottante C3 dans le dispositif de recyclage. Calcul de la dénivelée H2 - H3.
- Annexe 5 - Plans des éléments du dispositif de recyclage du ruissellement.
- Annexe 6 - Fonctionnement du dispositif de recyclage.

Introduction

Le minisimulateur de pluie [3], utilisé à l'ORSTOM depuis une dizaine d'années, a fait ses preuves en tant qu'instrument de terrain permettant la reproduction d'averses à intensités variables, proches des averses naturelles, sur des parcelles de 1 mètre carré. La mesure concomitante des débits ruisselés à l'aval de ces parcelles, permet de faire une description précise de leur aptitude au ruissellement.

Si la modélisation du ruissellement à l'échelle du mètre carré ne pose donc plus trop de problèmes, grâce à cet outil, l'extrapolation de ces résultats quasi-punctuels à l'échelle d'un bassin versant se heurte encore à de nombreuses difficultés. Celles-ci résultent entre autres de :

- la variabilité spatiale de l'aptitude à l'infiltration des sols, ce qui pose le problème de la représentativité d'une parcelle de 1 mètre carré pour de grandes unités de surface, jugées homogènes du point de vue de la description pédologique.
- l'évolution de l'écoulement le long des versants, entre le sommet de pente, qui ne reçoit aucun ruissellement en provenance de l'amont (et qu'on peut juger, de ce fait, bien représenté par une parcelle de 1 mètre carré), et l'arrivée dans le réseau de drainage.
- les pertes dans le réseau de drainage.
- les phénomènes d'endoréisme à une échelle supérieure à celle des flaques qu'on peut observer sur une parcelle de 1 mètre carré.

Seul le second de ces problèmes sera étudié dans cette note.

Comment évaluer le ruissellement tout au long d'un versant homogène de pente constante, à partir de mesures faites sur une parcelle de 1 mètre carré ? Du fait qu'elle est limitée par des tôles, cette parcelle ne reçoit aucun apport sous forme ruisselée. Le long d'un versant naturel, chaque mètre carré reçoit au contraire, en plus de la pluie, le ruissellement provenant de l'amont.

Il faudrait donc pouvoir faire intervenir cet apport supplémentaire, qui se traduit par une augmentation de la lame d'eau en surface, dans l'interprétation des résultats obtenus sur la parcelle de 1 mètre carré. Pour cela, on va envisager deux méthodes différentes, qui sont exposées respectivement dans la première et la deuxième partie de ce rapport.

La première méthode consiste à trouver un modèle tenant compte du stockage d'eau en surface (épaisseur de lame d'eau), qui puisse être calé sur les résultats obtenus par pluies simulées sur des parcelles de 1 mètre carré. Ce modèle pourra alors être extrapolé le long d'un versant, en faisant l'hypothèse simplificatrice qu'un apport sous forme de ruissellement a un effet comparable à celui d'un apport sous forme de pluie.

La deuxième méthode consiste à simuler, sur une parcelle testée avec le minisimulateur de pluie, un apport ruisselé qui pourrait représenter le ruissellement issu de l'amont. Un dispositif simple, qui permet de réinjecter en continu à l'amont de la parcelle, un débit égal au débit recueilli à l'aval, sera proposé à cet effet.

Avant de poursuivre, je tiens à remercier Y. BOREL et G. DELFIEU, qui ont participé à la mise au point et aux essais du dispositif de recyclage de ruissellement, ainsi que A. CASENAVE pour ses conseils sur la rédaction de cette note.

Liste des notations utilisées dans la première partie

- A_1, \dots, A_n : paramètres caractérisant l'aptitude à l'infiltration du sol
 C_1, C_2, C_3 : constantes caractéristiques de la relation $Q_{r,i}$ (Q_R) pour une parcelle
 E : écart type moyen sur les débits ruisselés, entre valeurs mesurées et modélisées
 e : incertitude absolue sur l'évaluation des intensités de ruissellement à partir des limnigrammes
 $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$: fonctions
 g : accélération de la pesanteur
 H : niveau de la surface libre dans le modèle
 h : épaisseur de la lame d'eau à la surface de la parcelle
 H_L : cote du seuil du déversoir percé
 I : intensité de pluie
 i : numéro d'ordre de l'averse
 IK : indice des précipitations antérieures
 IK_i : valeur de IK relative au début de l'averse i
 $IK_{i,f}$: valeur de IK relative à la fin de l'averse i
 I_{min} : intensité minimale de ruissellement
 j : abscisse le long de la pente
 K : constante dans la formule du déversoir
 k_i : rapport entre $Q_{r,i}$ et $Q_{r,o}$
 K_1 : pente des variations de S avec IK
 K_2 : valeur maximale de S
 K_3 : exposant dans la formule de l'indice IK
 l : longueur de parcelle
 L_a : lame ruisselée
 N : exposant dans la formule du déversoir
 n : nombre de paramètres caractérisant l'aptitude à l'infiltration du sol
 n_i : nombre de pas de temps T compris dans la durée sur laquelle on évalue l'ajustement du modèle pour l'averse i .

- P : hauteur de pluie
- p : nombre d'averses
- Q_f : débit infiltré sur la parcelle
- $Q_{f,o}$: débit infiltré moyen sur la parcelle, correspondant aux différentes averses
- q_f : débit sortant par l'orifice de fuite dans le modèle
- Q_i : débit de pluie
- Q_R : débit ruisselé sur la parcelle
- q_R : débit sortant du déversoir dans le modèle
- R : part d'erreur relative sur les intensités ruisselées due à l'inadéquation du modèle
- \mathcal{R} : coefficient de corrélation entre S et IK
- S : section de l'orifice de fuite dans le modèle
- S_p : superficie de la parcelle, et section de la cuve dans le modèle
- T : pas de temps de dépouillement des limnigrammes
- t : temps
- t_o : instant du début de l'averse
- t_i : instant du début de l'averse i
- $t_{i,f}$: instant de la fin de l'averse i
- V : vitesse moyenne de l'eau à travers l'orifice de fuite, dans le modèle.
- z : axe vertical dirigé vers le haut.
- Z_{eau} : altitude suivant z de la surface libre de la lame d'eau
- Z_{sol} : altitude suivant z de la surface topographique du sol
- δt : pas de temps de discrétisation du modèle

lère partie

I - Recherche d'un modèle simple à stockage de surface.

1) Approche théorique qualitative

On considère une parcelle de dimensions fixées, repérée dans un système d'axes perpendiculaires x y z , avec z désignant l'axe vertical dirigé vers le haut.

La surface topographique de la parcelle peut alors être définie par :

$$z = Z_{sol} (x, y)$$

On peut également décrire à tout instant la topographie de la surface libre de la lame d'eau recouvrant la parcelle par :

$$z = Z_{eau} (x, y)$$

Pour des conditions limites à l'aval données, il est logique de penser que le débit ruisselé à l'aval de la parcelle est une fonction des deux champs de scalaires Z_{sol} et Z_{eau} sur la parcelle :

$$Q_R = f_1 (Z_{sol}, Z_{eau})$$

On fait maintenant l'hypothèse suivante :

Hypothèse 1 La surface topographique de la parcelle reste constante (érosion négligeable).

Dans ce cas, on peut dire que le débit ruisselé est fonction uniquement du champ de l'épaisseur de la lame d'eau en surface, noté h :

$Q_R = f_2 (h)$	(1)
-----------------	-----

$$h (x, y) = Z_{eau} (x, y) - Z_{sol} (x, y)$$

On considère maintenant que la parcelle se trouve dans le cas décrit dans l'hypothèse suivante :

Hypothèse 2 : l'épaisseur d'eau en surface est non nulle sur une majeure partie de la surface de la parcelle.

Dans les hypothèses 1 et 2, on peut penser que l'intensité de pluie intervient peu et que le débit infiltré dans la parcelle doit être fonction essentiellement du champ de l'épaisseur de la lame d'eau en surface et des champs d'un certain nombre de paramètres traduisant l'aptitude instantanée à l'infiltration du sol :

$$Q_f = f_3 (h, A_1, \dots, A_n)$$

avec : $A_1 (x, y), \dots, A_n (x, y)$ champs de n paramètres indépendants de h , caractérisant l'aptitude à l'infiltration du sol à un instant donné.

On sait par ailleurs d'après Lafforgue [1] que lorsqu'on soumet une parcelle de 10 mètres de long à une pluie simulée d'intensité constante, le débit ruisselé résultant devient constant à partir d'un certain temps. Ce fait a été observé également à l'aide du minisimulateur de pluie sur de nombreuses parcelles de 1 m x 1 m, soumises à des averses en forme de succession de paliers à intensités constantes. Dans ce cas, au cours d'une averse donnée, l'intensité de ruissellement tend pour chaque palier suffisamment long, vers une limite constante dépendant de l'intensité de pluie du palier.

Admettons que ces observations correspondent bien à l'existence de valeurs limites d'intensité de ruissellement dépendant des intensités de pluie, et non pas à des variations de ruissellement non nulles mais trop lentes pour être mesurées sur des temps courts, ce que nous traduisons par l'hypothèse suivante :

Hypothèse 3 : au cours d'une averse donnée, si l'intensité de pluie reste constante, l'intensité de ruissellement atteint au bout d'un certain temps une limite constante dépendant de l'intensité de pluie.

Dans cette hypothèse, et quand un tel régime permanent de ruissellement est atteint, on a :

$$Q_R = f_2(h) = C^{te} \implies dh(x,y) / dt = 0 \quad \forall x,y$$

$$\implies Q_f = I.S_p - Q_R - \frac{d}{dt} \iint h(x,y) dx dy = I.S_p - Q_R = C^{te}$$

avec

I	: intensité de pluie constante (mm/H)
S _p	: surface de la parcelle

On a donc :

$$\begin{cases} Q_f = f_3(h, A_1, \dots, A_n) = C^{te} \\ h = C^{te} \end{cases}$$

La solution la plus simple et la plus logique consiste alors à admettre, pour que ce système d'équations soit vérifié, que les champs des paramètres décrivant l'aptitude au ruissellement de la parcelle soient constants pendant le régime permanent.

$$\frac{d}{dt} A_1(x,y) = \dots = \frac{d}{dt} A_n(x,y) = 0 \quad \forall x,y.$$

A priori, les paramètres A_1, \dots, A_n devraient être fonction à tout instant t , de l'état d'humectation initial du sol à l'instant t_0 marquant le début de la pluie, et du hétéogramme d'averse entre t_0 et t .

La dernière égalité nous montre que ces paramètres ne dépendent pas, du moins pendant un régime permanent, de la quantité d'eau déversée par le simulateur, puisque celle-ci croit alors que les paramètres restent constants. On peut admettre qu'il doit en être de même pendant toute la durée de la pluie.

Par ailleurs, dans le cas où la parcelle n'est pas trop soumise au phénomène de battance qui a tendance à imperméabiliser la surface du sol sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes, on peut admettre qu'à l'échelle d'une averse, les paramètres décrivant l'aptitude à l'infiltration du sol varient peu en fonction de l'intensité de pluie.

Tout ceci nous montre qu'il n'est pas déraisonnable de faire l'hypothèse suivante :

Hypothèse 4 : au cours d'une averse tombant sur une parcelle peu exposée au phénomène de battance, les paramètres décrivant l'aptitude à l'infiltration du sol ne sont fonction que de l'état d'humectation de la parcelle au début de l'averse, et restent constants pendant toute la durée de l'averse.

On en déduit donc :

$$Q_f = f_3 (h, A_{1,i} \dots, A_{n,i}) \quad (2)$$

avec : $\left| \begin{array}{l} A_{1,i} (x,y), \dots, A_{n,i} (x,y) \text{ champs des } n \text{ paramètres caractérisant} \\ \text{l'aptitude à l'infiltration du sol au début de l'averse } i, \text{ liée à son} \\ \text{état d'humectation} \end{array} \right.$

En supposant que f_2 soit inversible, (1) et (2) donnent :

$$Q_f = f_3 [f_2^{-1} (Q_R), A_{1,i}, \dots, A_{n,i}] \quad (3)$$

2) Analyse de mesures de terrain

a) présentation des données utilisées

Pour essayer de voir quelle pourrait être la forme des fonctions f_2 et f_3 , on a utilisé les données obtenues lors d'une campagne de mesures sous pluies simulées sur le bassin de la Daye à Dzogbegan (Togo) [2].

Dix parcelles de $1m^2$ avaient été testées à l'aide d'un mini-simulateur de pluie [3]. Les parcelles 9 et 10, implantées sur des terrains sableux, n'avaient donné pratiquement aucun ruissellement, et ne peuvent donc être utilisées ici. L'apparition de trous de souris et de fourmilières pendant les mesures, rendent douteux les résultats de la parcelle 4, qui ne seront pas non plus utilisés.

Chaque parcelle fut soumise à une succession de 6 averses, séparées par des temps de ressuyage calculés de façon à ce que l'état d'humectation préalable du sol, croisse (en principe) d'averse en averse.

Les hyétogrammes des averses 1 et 6 étaient sensés reproduire une averse d'occurrence décennale, et ceux des averses 2, 3, 4 et 5 une averse d'occurrence annuelle.

averse décennale :

intensité (mm/H)	30	60	140	120	100	80	40
durée (mn)	30	10	10	10	10	10	10

averse annuelle :

intensité (mm/H)	30	50	140	100	70	40
durée (mn)	10	10	10	10	10	10

Pendant chaque averse, la totalité du ruissellement de la parcelle était collectée dans une cuve, où le niveau de l'eau était enregistré à l'aide d'un limnigraphe.

Ces enregistrements nous donnent donc directement les variations du volume ruisselé pendant les averses, qu'on interprète en général en lame d'eau (en mm) - soit un volume divisé par la surface de la parcelle.

Pour cette étude, l'ensemble des linnigrammes, qui avaient déjà été exploités dans [2], a été redépouillé à fins de vérification. Ceci a permis d'évaluer, par comparaison des résultats, l'ordre de grandeur de l'incertitude relative liée au dépouillement, qui entache les valeurs des intensités instantanées (ruissellement ou hyétogramme d'averse), obtenues en mesurant la pente des linnigrammes :

entre 0 et 1 mm/H :	50 %
entre 1 et 5 mm/H :	20 %
entre 5 et 50 mm/H :	4 %
au dessus de 50 mm/H :	3 %

Le détail des résultats obtenus sur les parcelles 1, 2, 3, 5, 6, 7 et 8, utilisés ici, est reporté dans l'annexe 1 avec une description sommaire des parcelles.

b) interprétation des mesures, et résultats obtenus

Dans un premier temps, on a examiné les débits ruisselés obtenus à la fin des plages d'intensité constante de pluie, en supposant qu'un régime permanent était alors toujours atteint. On déduisait alors les valeurs de l'intensité d'infiltration de :

$$I.S_p = Q_f + Q_R \implies Q_f = I.S_p - Q_R$$

On a ensuite porté sur un graphique I, Q_f , pour chaque parcelle, les séries de 6 ou 7 points correspondant chacune à une averse.

Sur les mêmes graphiques, on a reporté autour de chaque point I, Q_f , le parallélogramme d'incertitude déduit des valeurs d'incertitude relative sur I et Q_R mentionnées plus haut, puis on a tracé pour chaque averse i la courbe $Q_{f,i}(I)$ passant au plus près de la série de points de l'averse.

On a ensuite déduit de ces courbes, les courbes $Q_{f,i}(Q_R)$ correspondantes, et on a calculé une courbe fictive $Q_{f,o}(Q_R)$ correspondant à la moyenne des courbes $Q_{f,i}(Q_R)$:

$$Q_{f,o}(Q_R) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p Q_{f,i}(Q_R)$$

avec p : nombre d'averses.

On constate alors que pour chaque averse i, on peut trouver une constante k_i telle que :

$$Q_{f,i}(Q_R) \approx k_i \cdot Q_{f,o}(Q_R) \quad \forall Q_R \quad (4)$$

Ces relations sont bien vérifiées pour toutes les parcelles, à l'exception de quelques points qui s'écartent un peu trop des courbes $k_i \cdot Q_{f,o}(Q_R)$, et qui correspondent peut-être à des cas où un régime permanent n'était pas encore réellement atteint.

Il s'avère donc que pour une parcelle donnée, les courbes $Q_f(Q_R)$ relatives aux différentesaverses sont toutes homothétiques.

Ce résultat obtenu sur 7 parcelles différentes, traduit probablement une réalité physique. Il serait intéressant de voir s'il peut être généralisé à d'autres types de sols, en testant les parcelles avec desaverses dont les plages d'intensité constante seraient plus longues que celles utilisées ici (20 minutes par exemple), de manière à obtenir plus sûrement des régimes permanents.

Pour l'instant, on peut admettre que ce résultat est général, et on déduit de (3) et (4) :

$$\left. \begin{aligned} Q_{f,i} &= f_3 [f_2^{-1}(Q_R), A_{1,i}, \dots, A_{n,i}] \\ Q_{f,i}(Q_R) &\approx k_i \cdot Q_{f,o}(Q_R) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$Q_{f,i} \approx f_4(Q_R) \cdot f_5(A_{1,i}, \dots, A_{n,i})$$

avec $f_4(Q_R) = Q_{f,o}(Q_R)$ et $f_5(A_{1,i}, \dots, A_{n,i}) = k_i$

$$\Rightarrow Q_{f,i} \approx f_4(f_2(h)) \cdot f_5(A_{1,i}, \dots, A_{n,i})$$

$$\Rightarrow \boxed{Q_{f,i} \approx f_6(h) \cdot f_5(A_{1,i}, \dots, A_{n,i})} \quad (5)$$

Pour chacune des parcelles testées, on montre qu'on peut faire coïncider de façon satisfaisante la fonction $f_4(Q_R)$, soit $Q_{f,o}(Q_R)$, avec une fonction du type :

$$Q_{f,o} = C_1 \cdot \sqrt{Q_R^2 + C_3} \quad (6)$$

avec C_1, C_2, C_3 constantes

Par conséquent :

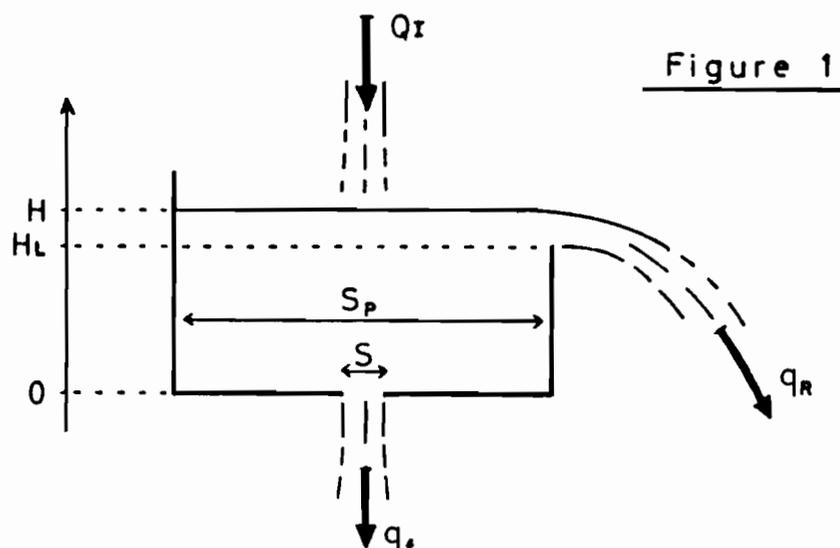
$$\boxed{Q_{f,i} = k_i \cdot C_1 \cdot \sqrt{Q_R^2 + C_3}} \quad (7)$$

Ce résultat nous a amenés à essayer de décrire le fonctionnement des parcelles par un modèle analogique représentant un déversoir percé. En effet, le fonctionnement d'un tel dispositif peut être décrit, comme on le verra plus loin, par des équations analogues à (1), (5) et (7).

3) Le modèle analogique du déversoir percé

a) présentation du modèle

On considère un cuve en forme de parallélépipède rectangle, dont le fond est percé d'un orifice et dont le haut d'un des côtés est échancré de façon à former un déversoir. Voir fig. 1 :



On note :

- H : axe des cotes dirigé vers le haut, dont l'origine se situe au niveau du fond de la cuve.
 H_L : cote du seuil de déversoir.
 S_p : section de la cuve, égale à la surface de la parcelle à modéliser.
 S : section de l'orifice du fond de cuve
 Q_I : débit déversé dans la cuve ($= I \cdot S_p$)
 q_R : débit sortant de la cuve par le déversoir
 q_f : débit sortant de la cuve par l'orifice de fond.

L'analogie avec la parcelle est évidente, puisqu'on peut assimiler q_R au débit ruisselé, Q_I au débit de la pluie, et q_f au débit infiltré. Le fond de la cuve correspond à la surface du sol, et l'eau dans la cuve représente l'épaisseur moyenne de la lame d'eau à la surface de la parcelle.

b) équations décrivant le fonctionnement hydraulique du modèle

Notre but étant de schématiser le comportement d'une parcelle, on applique les équations de l'hydraulique sur le modèle retenu en faisant un maximum d'hypothèses simplificatrices, et sans trop se soucier des limites d'application de ces formules, contraction de veines, coefficients correcteurs etc.

On suppose que le profil d'échancrure du déversoir réalise une loi $q_R(H)$ du type :

$$q_R = K \cdot (H - H_L)^{N/2} \quad \text{avec } K \text{ et } N \text{ constantes.}$$

Afin de diminuer le nombre de paramètres du modèle, on impose d'entrée :

$$K = 1$$

$$\Rightarrow \boxed{q_R = (H - H_L)^{N/2} \text{ pour } H \geq H_L} \quad (8) \text{ avec : } q_R \text{ (m}^3/\text{s) et } H \text{ (m)}$$

En supposant que la pression de l'air est la même au-dessus de la surface libre et au niveau de l'orifice de fuite, l'application du théorème de Bernoulli entre ces deux points (en supposant la vitesse nulle à la surface libre) nous permet d'évaluer la vitesse moyenne V de l'écoulement à travers l'orifice par :

$$H = \frac{V^2}{2g} \Rightarrow V = \sqrt{2gH} \quad \text{avec } g \text{ (m/s}^2\text{)} : \text{ accélération de la pesanteur.}$$

$$\Rightarrow \boxed{q_f = S \cdot \sqrt{2gH}} \quad (9) \quad \text{avec : } q_f \text{ (m}^3/\text{s), } S \text{ (m}^2\text{), } H \text{ (m)}$$

La conservation des volumes nous permet d'écrire :

$$\boxed{Q_I = q_R + q_f + S_p \cdot \frac{dH}{dt}} \quad (10)$$

Par ailleurs, l'élimination de H entre (8) et (9) donne :

$$q_f = S \sqrt{2g} \cdot \sqrt{q_R^{2/N} + H_L} \quad \text{pour } H > H_L \quad (11)$$

On constate que les équations (8), (9) et (11) sont bien conformes respectivement aux équations (1), (5) et (7). L'analogie nous amène à poser les égalités suivantes :

$$\begin{cases} S \sqrt{2g} = k_i \cdot C_1 = C_1 \cdot f_5 (A_{1,i}, \dots, A_{n,i}) \\ 2/N = C_2 \\ H_L = C_3 \end{cases}$$

Conclusion : Pour une parcelle donnée, N et H_L doivent être considérés comme constants et caractéristiques de la parcelle, et S doit être, pour chaque averse, considéré comme une constante caractéristique de l'aptitude à l'infiltration du sol au début de l'averse.

II - Calage du modèle sur les mesures de terrain

1) Méthode employée

a) reconstitution d'un linnigramme $q_R(t)$ avec le modèle

On considère une averse dont le hyétogramme fournit un débit $Q_I(t)$.

Les coefficients S, N et H_L étant fixés, il faut pour reconstituer les linnigrammes $q_R(t)$ et $q_f(t)$, intégrer le système constitué des équations (8), (9) et (10).

Une solution analytique simple n'apparaît que dans le cas où Q_I est constant et H inférieur à H_L . Dans le cas général, il faut discrétiser le système, en procédant de la façon suivante :

On se fixe un pas de temps de discrétisation δt , l'origine des temps étant le début de l'averse.

On résoud ensuite par itération le système suivant :

$$t = t_0 = 0 \implies H(t)$$

$$(12) \quad \forall t \quad \begin{cases} H(t) < H_L \implies q_R(t + \delta t) = 0 \\ H(t) \geq H_L \implies q_R(t + \delta t) = (H(t) - H_L)^{N/2} \\ q_f(t + \delta t) = S \sqrt{2g H(t)} \\ H(t + \delta t) = \text{Max} \left[0, H(t) + [Q_I(t + \delta t) - q_R(t + \delta t) - q_f(t + \delta t)] \cdot \delta t / S_p \right] \end{cases}$$

Des essais faits avec différentes valeurs de δt , montrent qu'un pas de temps de 10 secondes permet un calcul suffisamment précis, des pas de temps plus courts ne modifiant pas les résultats.

b) calcul des paramètres S, N et H_L du modèle

Si on veut reconstituer les débits ruisselés lors des p averses simulées sur une parcelle donnée, il nous faut déterminer pour cette parcelle 2 + p coefficients qui sont :

- N et H_L, valables pour toutes les averses
- p coefficients S, correspondant chacun à une averse, et qu'on notera S_i (pour i = 1...p).

Une première évaluation de ces coefficients peut être faite à partir des résultats obtenus par la méthode exposée plus haut (I 2) b)) :

$$\begin{cases} S_i = k_i \cdot C_1 / \sqrt{2g} \\ N = 2 / C_2 \\ H_L = C_3 \end{cases}$$

Cette évaluation ne s'appuie que sur un nombre limité de points, sensés représenter des régimes permanents, et ne prend en compte ni les régimes transitoires correspondant aux changements d'intensité de pluie, ni la phase d'imbibition au cours de laquelle, au début de la pluie, ne se produit aucun ruissellement.

Pour cette raison, on a décidé de faire un calcul d'optimisation portant sur les 3 paramètres N, H_L et C₁, en conservant la série des valeurs de k_i déjà déterminée.

La méthode employée est celle de Nelder et Mead [4], dans laquelle on a défini comme paramètre d'ajustement du modèle aux mesures de terrain, l'écart type moyen E entre débit ruisselé mesuré et débit ruisselé reconstitué par le modèle :

$$E = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (Q_R(j.T) - Q_{R'}(j.T))^2}$$

avec : p : nombre d'averses

T : pas de temps fixe, utilisé pour le dépouillement des limnigrammes, soit 150 secondes.

n_i : nombre de pas de temps T compris dans :
durée de l'averse i + 600 secondes (pour prendre en compte une éventuelle vidange du stockage de surface, après l'arrêt de la pluie).

Q_R (t) : débit ruisselé instantané à l'instant t, calculé avec le modèle utilisant un pas de temps de discrétisation de 10 secondes.

Q_{R'} (t) : débit ruisselé mesuré à l'instant t, sur un pas de temps T centré sur t.

Dans tous les cas, la méthode converge assez rapidement vers un triplet (N, H_L, C₁), qui ne dépend pas des valeurs choisies pour l'initialisation du calcul.

En conservant ce triplet, on modifie alors légèrement les valeurs de k_i de façon à ne retenir pour chaque averse i que la valeur de k_i permettant de minimiser l'expression :

$$\sum_{j=1}^{n_i} (q_R(j.T) - Q_R(j.T))^2$$

On refait ensuite un calcul d'optimisation de N , H_L et C_1 en partant de la nouvelle série de k_i obtenue, ce qui donne des triplets (N, H_L, C_1) améliorant un peu les valeurs de E , mais très proches des premiers triplets obtenus.

Remarque :

Des essais ont été faits pour faire intervenir dans le modèle une dépression atmosphérique entre le niveau de surface libre et le niveau de l'orifice du fond de cuve, ainsi qu'une valeur différente de S_p pour la section de la cuve au-dessus du niveau H_L , et une valeur de K différente de 1 dans la formule du déversoir. Les faibles améliorations constatées alors sur E ne justifient pas qu'on retienne cette solution qui a l'inconvénient d'augmenter le nombre de paramètres du modèle.

2) Résultats obtenus

Les valeurs des paramètres N , H_L et S issues des calculs d'optimisation figurent dans le tableau 1.

Tableau 1 : Ajustement des paramètres du modèle.

Parcelle	1	2	3	5	6	7	8
N	3.56	4.15	3.60	4.29	3.96	4.00	3.73
HL (mm)	3.39	4.03	1.35	2.77	4.98	0.742	1.06
S averse 1 (mm ²)	38.3	39.5	181		91.0	105	110
S averse 2 (mm ²)	36.5	50.0	134	102	83.2	105	103
S averse 3 (mm ²)	28.7	42.1	88.4	71.7	57.2		95.6
S averse 4 (mm ²)	29.0	32.3	71.8	65.4	47.3	83.7	88.6
S averse 5 (mm ²)	30.3	33.1	59.2	61.3	44.7	67.8	76.3
S averse 6 (mm ²)	22.9	26.3	46.6	45.8	29.1	56.9	50.0

On peut constater sur les graphiques regroupés dans l'annexe 2, le bon ajustement des limnigrammes reconstitués par le modèle utilisant ces valeurs de paramètres.

Une autre façon d'évaluer cet ajustement consiste à examiner pour chaque parcelle la valeur de l'écart type E (défini plus haut), qui donne une évaluation de l'erreur absolue obtenue dans la reconstitution des débits ruisselés. Cette erreur absolue est due :

- d'une part à l'erreur commise dans la modélisation, qui résulte à la fois de l'inadéquation du modèle, et de l'incertitude portant sur le dépouillement des intensités de pluie utilisées dans le modèle.
- d'autre part à l'incertitude e portant sur la mesure des intensités de ruissellement.

La part R d'erreur relative sur les débits ruisselés, due à l'inadéquation du modèle peut donc être estimée par :

$$R < \frac{E - e}{\overline{Q_R}}$$

où $\overline{Q_R}$ représente le débit moyen ruisselé de la parcelle sur l'ensemble des averse (évalué, pour chaque averse, sur un temps égal à la durée de l'averse + 600 secondes).

$$\overline{Q_R} = \frac{1}{P} \cdot \sum_{i=1}^P \left[\frac{V_i}{T \cdot n_i} \right]$$

avec V_i : volume ruisselé total pendant l'averse i
Les autres notations sont définies plus haut.

Les enregistrements limnigraphiques représentent la lame ruisselée de la parcelle dans un rapport de 10. On peut alors estimer que le dépouillement de la lame ruisselée est fait avec une imprécision de : 0,025 mm.

Les débits ruisselés étant calculés sur un temps de 150 secondes, on en déduit donc la valeur de e :

$$e = 2 \times 0,025 \times 3600 / 150 \Rightarrow e = 1,2 \text{ mm} / H.$$

Les valeurs de E, $\overline{Q_R}$ et R figurent dans le tableau 2.

Tableau 2 : Evaluation de l'inadéquation R du modèle.

Parcelle	1	2	3	5	6	7	8
E (mm / H)	4.04	3.45	2.00	2.10	3.04	2.24	2.05
$\overline{Q_R}$ (mm/ H)	34.6	22.29	16.14	9.75	12.36	13.85	14.56
R (%) <	8.2	10.0	5.0	9.2	14.9	7.5	5.8

Conclusion : Le modèle permet de reconstituer les limnigrammes ruisselés de façon satisfaisante. Les différentes phases du ruissellement (imbibition, phases transitoires, régimes permanents s'ils sont atteints, vidange) sont correctement reproduites.

3) Variations du paramètre S avec l'état d'humectation du sol

D'ores et déjà, on peut dire que nous avons atteint notre but initial, qui était de trouver un modèle simple pouvant représenter les phénomènes.

Tel qu'il a été défini, ce modèle nécessite pour reproduire les limnigrammes relatifs à p averses sur une parcelle, le calage de :

- 2 paramètres caractéristiques de la parcelle (N et H_L)
- 1 paramètre par averse (S), caractéristique de la parcelle et de son état d'humectation au début de l'averse.

Ramené au nombre p d'averses, ceci représente donc 1 + 2/p paramètres de calage par averse, ce qui n'est pas excessif.

Ce modèle du déversoir est-il utilisable pour faire de la reconstitution d'écoulement, comme peuvent le faire d'autres modèles ? Classiquement, ceux-ci utilisent les résultats de simulation de pluie pour caler un certain nombre de paramètres caractéristiques des parcelles, qui sont ensuite utilisés pour calculer les ruissellements correspondant à une série quelconque de pluies.

Dans cette optique, le défaut du modèle du déversoir percé est de faire intervenir un paramètre S qui est lié non seulement au sol mais aussi à son état d'humectation.

Pour pallier ce défaut, nous avons tenté de relier S à l'indice des précipitations antérieures IK, classiquement utilisé dans les études de parcelles sous pluies simulées, et qui est sensé représenter l'état d'humectation du sol à un instant donné.

Cet indice, évalué sous forme de lame d'eau, peut être interprété comme un stock d'humidité du sol, nul pour un sol sec, qui augmenterait par infiltration quand il pleut, et qui diminuerait à une vitesse proportionnelle à sa taille quand il ne pleut pas :

$$\left\{ \begin{array}{l} IK_{i,f} = IK_i + P_i \\ \frac{d}{dt} IK = -K_3 \cdot IK \Rightarrow IK(t_2) = IK(t_1) \cdot e^{-K_3(t_2 - t_1)} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} \forall t_1, t_2 \\ \text{hors averse} \end{array} \right.$$

avec :

IK _i	:	indice au début de l'averse i
IK _{i,f}	:	indice à la fin de l'averse i
P _i	:	hauteur de pluie de l'averse i
K ₃	:	constante

On en déduit : $IK_{i+1} = (IK_i + P_i) \cdot e^{-K_3(t_{i+1} - t_{i,f})}$

en notant :

t _{i+1}	:	temps marquant le début de l'averse i+1
t _{i,f}	:	temps marquant la fin de l'averse i

Ceci est la forme classique d'utilisation de cet indice. Nous allons utiliser une forme légèrement différente :

$$IK_{i+1} = (IK_i + F_i) \cdot e^{-K_3 (t_{i+1} - t_{i,f})} \quad (13)$$

où F_i , lame d'eau infiltrée pendant l'averse i , remplace P_i , hauteur de pluie.

Il semble en effet logique d'admettre que le stock d'eau du sol varie plus en fonction de la lame infiltrée que de la hauteur de pluie elle-même.

Le danger de cette approche est un risque de dérive des résultats dans la reconstitution d'une chronique de ruissellement, puisqu'elle introduit pour chaque averse, un coefficient dépendant lui-même du résultat du modèle pour l'averse précédente. Cependant, le fait que IK s'annule de toute façon rapidement en l'absence de pluie doit limiter ce risque, et nous encourage à procéder ainsi.

On cherche pour chaque parcelle, les valeurs de K_1 , K_2 et K_3 telles que :

$$\left\{ \begin{array}{l} S \equiv K_1 \cdot IK + K_2 \quad \text{avec } S \text{ (mm}^2\text{)}, K_1 \text{ (mm)}, IK \text{ (mm)}, K_2 \text{ (mm}^2\text{)} \\ IK \text{ étant défini par (13), avec des temps exprimés en jours.} \end{array} \right.$$

Les résultats de ce calcul sont portés dans le tableau 3 avec les valeurs du coefficient de corrélation \mathcal{R} . Ils sont aussi représentés sur la figure 2.

Tableau 3

parcelle	1	2	3	5	6	7	8
Taille de l'échantillon	6	5	6	5	6	5	6
K_3 optimal	0.5	1.9	0.3	0.8	0.9	1.4	0.05
- \mathcal{R} pour K_3 optimal	0.91	1.00	0.99	0.96	0.99	0.99	0.93
- \mathcal{R} pour $K_3 = 0,5$	0.91	0.99	0.99	0.96	0.98	0.97	0.92
K_1 (mm) pour $K_3 = 0.5$	-0.225	-0.393	-1.47	-0.593	-0.659	-0.496	-0.573
K_2 (mm ²) pour $K_3 = 0.5$	38.2	56.9	172	110	93.9	110	116

On peut constater que les valeurs optimales de K_3 , comprises entre 0,05 et 1,9, varient selon les parcelles. Cependant, la faible différence entre les valeurs de \mathcal{R} , relatives aux valeurs optimales de K_3 d'une part, et à la valeur 0,5 classiquement utilisée pour K_3 d'autre part, nous a incités à fixer $K_3 = 0,5$ pour toutes les parcelles. Ceci à l'avantage de diminuer le nombre de paramètres à caler.

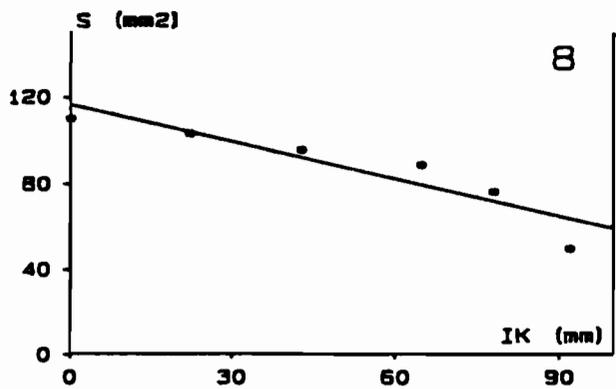
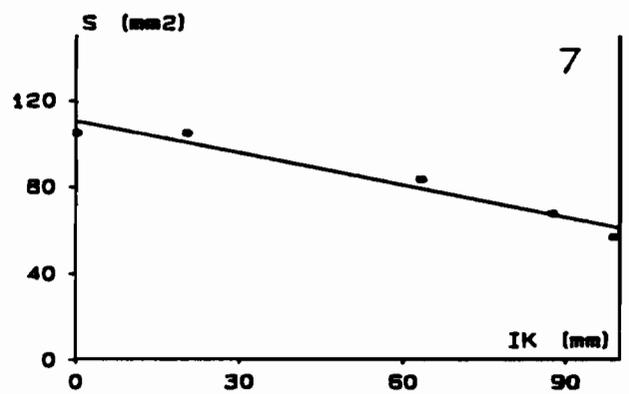
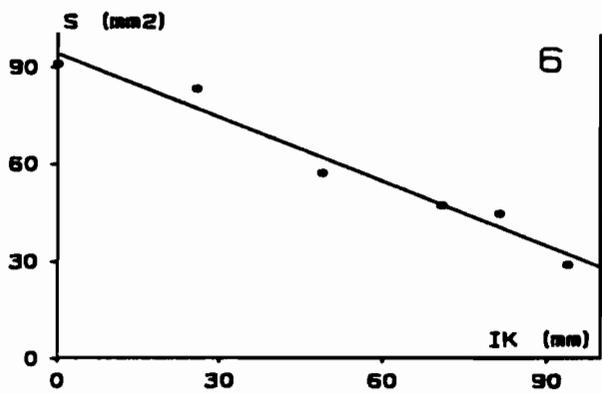
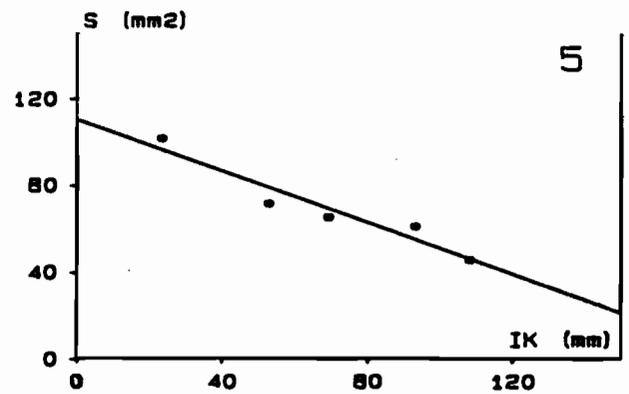
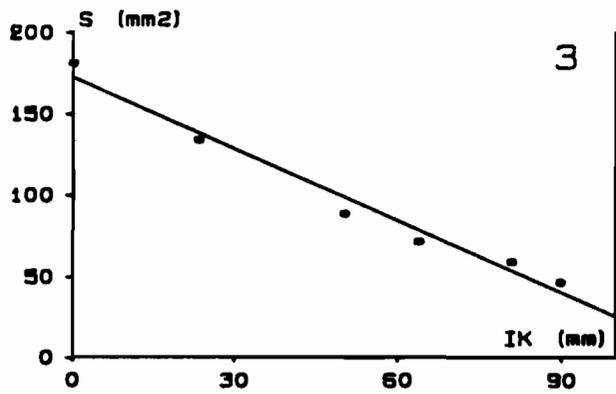
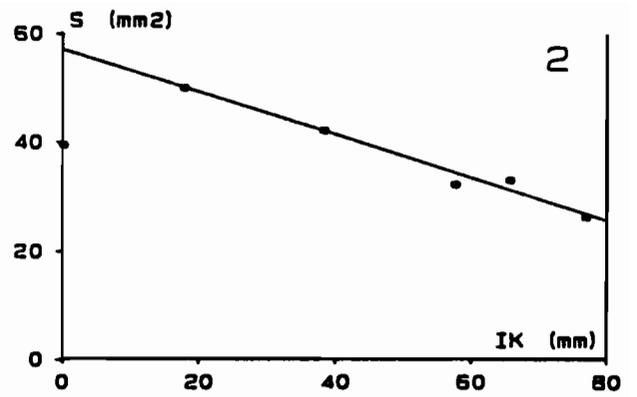
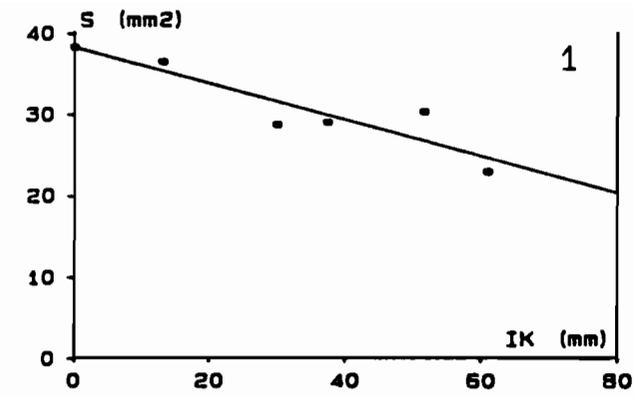


Figure 2 : variations de S en fonction de IK pour chaque parcelle

Bien que la taille des échantillons soit faible (5 ou 6), les fortes valeurs de R permettent de penser que les liaisons entre S et IK sont significatives pour toutes les parcelles, et que les valeurs de K_1 et K_2 sont des caractéristiques des sols.

Etant donnée la bonne qualité des relations S (IK) (fig. 2), il est évident que la reconstitution des hydrogrammes à partir de N, H_L , K_1 et K_2 serait proche de celle qui a été faite à partir de N, H_L et S (annexe 2).

Remarque : la valeur de S correspondant à l'averse 1 sur la parcelle 2 a été écartée de l'échantillon pour le calcul de régression. Lors de cette averse, un problème d'appareillage avait empêché la reproduction des fortes intensités de pluie, et avait entraîné un hyétogramme d'averse très différent des autres. Le fait que la valeur de S correspondante s'écarte beaucoup de la relation S (IK) établie sur les autres averses peut être interprété de deux façons :

- La différence résulte de la forme particulière du hyétogramme. Dans ce cas, les coefficients K_1 et K_2 doivent être considérés comme caractéristiques non seulement de la parcelle, mais aussi de la forme des hyétogrammes. Cette interprétation remet en cause toute la théorie précédente.
- La valeur des intensités de pluie délivrées a été faussée par le problème d'appareillage.

Nous avons retenu cette seconde hypothèse.

III - Conclusion sur le modèle du déversoir percé

1) Résumé de la méthode

On trouvera ci-après les équations qui décrivent le fonctionnement du modèle :

$$\left\{ \begin{array}{l} q_R = \begin{cases} 0 & \text{si } H < H_L \\ (H - H_L)^{N/2} & \text{si } H > H_L \end{cases} \\ q_f = S \sqrt{2g H} \\ Q_I = q_R + q_f + S_p \frac{dH}{dt} \quad (\text{équation à discrétiser}) \\ S = K_1 \cdot IK + K_2 \\ IK_{i+1} = (IK_i + F_i) \cdot e^{-0,5 (t_{i+1} - t_{i,f})} \\ IK = 0 \text{ pour un sol sec.} \end{array} \right.$$

L'utilisation de ce modèle nécessite le calage des quatre paramètres N, H_L , K_1 et K_2 , qui semblent être caractéristiques du sol. En l'état actuel des choses, ce calage doit être fait à partir des résultats d'une campagne de simulation de pluie.

Pour ce faire, il est inutile d'employer la méthode fastidieuse décrite plus haut, qui était nécessaire pour comprendre les phénomènes. Au contraire, on déterminera directement les 4 paramètres par la méthode d'optimisation de Nelder et Mead [4].

Dans ce calcul, le jeu initial de valeurs des paramètres pourra être choisi à partir des valeurs moyennes constatées sur les 7 parcelles de Daye, qui sont reportées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Paramètres du modèle : ordre de grandeur constaté sur 7 parcelles

paramètre	valeur minimale	valeur moyenne	valeur maximale
N	3,56	3,90	4,29
H _L (mm)	0,742	2,62	4,98
K ₁ (mm)	0,225	0,630	1,47
K ₂ (mm ²)	38,2	99,6	172

2) Tentative d'interprétation physique des 4 paramètres du modèle

- Le paramètre N peut certainement être interprété comme un indice du profil d'échancrure moyen, dans un plan vertical, de l'ensemble des microseuils contrôlant le ruissellement à la surface de la parcelle.

Dans notre modèle, la valeur de N correspond [5] aux profils d'échancrure suivants :

- N = 3 : déversoir rectangulaire classique
- N = 4 : déversoir parabolique
- N = 5 : déversoir triangulaire.

Les valeurs extrêmes constatées sur les parcelles de Daye (tableau 4), nous montrent que les profils des déversoirs percés équivalents varient entre ces 3 formes.

A priori, la valeur de N, à topographie de surface équivalente, doit varier avec la pente de la parcelle, mais il est difficile de dire dans quelle mesure. Une théorie de Boussinesq [5] donne bien un coefficient correcteur sur le débit déversé en fonction de l'angle d'inclinaison du déversoir, mais il semble hasardeux, pour l'instant, de l'appliquer ici. Seules des expérimentations pourront permettre de définir cet éventuel coefficient correcteur.

- Le paramètre H_L, qui représente une hauteur minimale de pluie d'imbibition, peut être interprété comme un indice du volume des dépressions qu'il est nécessaire de remplir avant que ne se produise un ruissellement sur la parcelle.

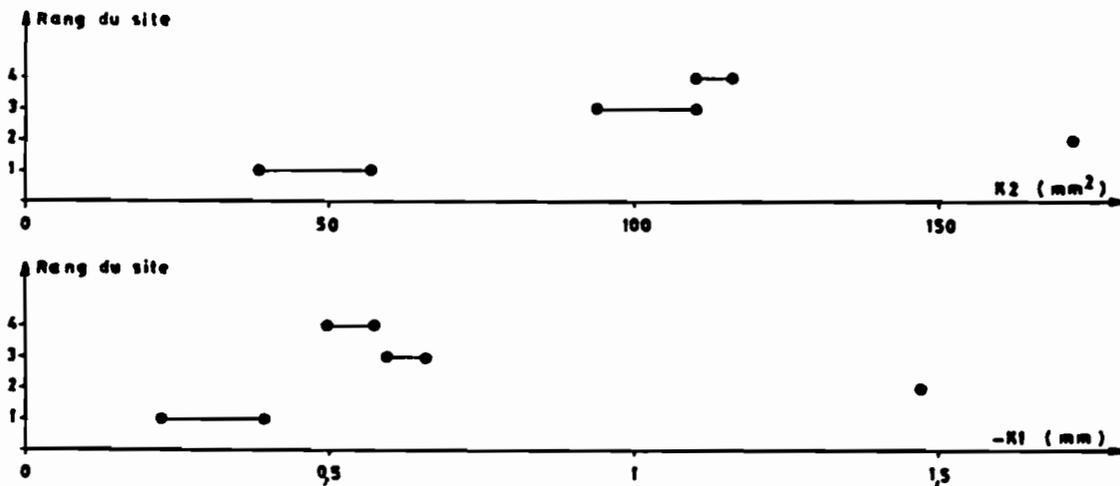
- Le paramètre K₂ représente la surface maximale du trou au fond du déversoir percé. Il correspond au cas du sol complètement sec, pour lequel l'aptitude à l'infiltration doit être maximale.

A priori, ce paramètre devrait être lié à la structure du sol, mais une vérification expérimentale s'impose.

- Le paramètre K_1 représente la vitesse de diminution du trou au fond du déversoir percé en fonction de l'indice IK . Là encore, des expérimentations sont nécessaires pour voir si K_1 ne serait pas lié à la variation de la succion matricielle du sol en fonction de sa teneur en eau.

La figure 3, où sont reportées les valeurs de K_1 et K_2 pour les différentes parcelles, fait ressortir un regroupement de ces valeurs suivant les sites d'implantation des parcelles (voir annexe 1). Ceci corrobore l'interprétation de K_1 et K_2 comme caractéristiques de la nature du sol.

Figure 3



3) Remarque sur $H - H_L$

La quantité $H - H_L$ du modèle peut être interprétée comme une hauteur moyenne de lame d'eau au-dessus des niveaux des microseuils de la parcelle. On constate que les valeurs atteintes par $H - H_L$ (8) ont un ordre de grandeur compatible avec cette interprétation. Voir le tableau 5.

Tableau 5 : Valeurs maximales de $H - H_L$ données par $Q_m^{2/N}$

Parcelle	1	2	3	5	6	7	8
Q_m max mesuré ($m^2 \cdot mm/H$)	129	100	100	71	99	83	88
$(H - H_L)$ max (mm)	3,18	6,37	2,94	6,40	4,97	4,80	3,37

4) Remarques sur la phase d'imbibition

Si on définit l'intensité minimale de ruissellement, I_{min} , comme l'intensité de pluie en dessous de laquelle aucun ruissellement n'est possible, alors le modèle nous donne :

$$I_{min} = \frac{S}{S_p} \sqrt{2g H_L}$$

Par ailleurs, le fonctionnement du modèle est tel que pour toute intensité de pluie, même inférieure à l'intensité minimale de ruissellement, le régime d'écoulement permanent correspond à une valeur de H non nulle :

$$H = (Q_I / S)^2 / 2g$$

Ceci signifie que toute intensité de pluie, même si elle ne provoque aucun ruissellement global sur la parcelle, entraîne quand même un remplissage partiel des dépressions. On sait que ceci est faux dans la réalité puisque une intensité de pluie suffisamment faible n'entraîne l'apparition d'aucune lame d'eau en surface.

Pour bien représenter cette réalité, il faudrait faire intervenir dans le modèle une dépression atmosphérique ΔH (exprimée en hauteur d'eau) entre la surface libre et l'orifice de fuite. En effet, on aurait dans ce cas :

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_I < S \sqrt{2g (H_L + \Delta H)} \implies \text{pas de ruissellement global} \\ Q_I < S \sqrt{2g \Delta H} \implies \text{pas d'apparition de lame d'eau} \end{array} \right.$$

Cette solution, qui représente probablement mieux la réalité, n'a pas été retenue, car elle introduisait un paramètre supplémentaire dans le modèle, sans pour autant améliorer de façon sensible le calage sur les valeurs expérimentales (seules les phases d'imbibition étaient un peu mieux reproduites).

5) Conclusion

Le modèle du déversoir percé, ne nécessitant le calage que de 4 paramètres caractéristiques du sol, peut s'avérer intéressant pour faire un calcul de reconstitution d'écoulement à l'échelle de la parcelle de 1 m². Sa principale qualité est de représenter assez bien les débits ruisselés y compris pendant les phases transitoires succédant aux changements d'intensité de pluie, puisqu'il tient compte des variations du stockage d'eau en surface. Or ces régimes transitoires constituent souvent la majeure partie des hydrogrammes ruisselés, comme on peut le constater à partir des points expérimentaux portés sur les graphiques de l'annexe 2. Sauf pour les sols très imperméables, les régimes permanents, même sur une parcelle de 1 m², ne sont souvent atteints qu'à partir d'une durée assez longue d'intensité de pluie constante.

Il serait donc intéressant de pouvoir tester ce modèle sur un plus grand nombre de parcelles. Le protocole de mesures devrait comprendre plusieurs averses de formes différentes, espacées dans le temps de façon à ce que l'état d'humectation initial du sol, représenté par l'indice IK , ne varie pas de façon monotone.

IV - Passage de l'échelle du mètre carré à l'échelle d'un versant

1) Hypothèses essentielles

Dans tout ce qui suit, nous allons essayer de voir comment transposer les résultats obtenus sur parcelles de 1 m^2 , à un versant homogène de plus grande dimension.

La condition d'homogénéité est ici très restrictive. Pour nous, cela signifie que des mesures de ruissellement sous pluie simulée faites sur une parcelle de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, orientée dans le sens de la pente, donneraient les mêmes résultats quel que soit le lieu d'implantation de la parcelle sur le versant.

En pratique, cela veut dire que chaque mètre carré du versant doit être équivalent à cette parcelle du point de vue de la pente moyenne, de la topographie de surface et de la nature du sol.

Ceci est bien sur un cas d'école qui peut sembler simpliste, mais qu'il est quand même intéressant d'examiner, puisqu'il peut donner une idée de l'évolution du ruissellement sur les parties homogènes d'un versant.

En plus de l'hypothèse d'homogénéité du versant, on suppose que les écoulements transversaux s'annulent globalement. Cette condition est indispensable pour extrapoler les résultats obtenus sur la parcelle de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, aux limites de laquelle les flux transversaux sont artificiellement annulés.

En pratique, on va donc s'intéresser maintenant à une parcelle fictive de 1 mètre de large et de longueur quelconque, qui serait identique, au sens défini ci-dessus, à la parcelle de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ étudiée sous pluie simulée.

Intuitivement, on peut prévoir que les réactions d'une telle parcelle à une averse d'intensité constante doivent être les suivantes :

- la lame d'eau à la surface de la parcelle croît à la fois avec le temps et avec l'abscisse, comptée le long de la parcelle de l'amont vers l'aval.
- la limite qui ne peut être dépassée par cette lame d'eau correspond à une valeur pour laquelle l'infiltration est égale à l'intensité de pluie.
- si la durée de la pluie est suffisamment longue, cette limite doit être atteinte à partir d'une certaine distance le long de la parcelle. Au-delà de cette limite, le ruissellement, l'infiltration et la lame d'eau restent constants le long de la pente.

Cette vision intuitive des choses demanderait à être démontrée mathématiquement, mais vu la difficulté du problème, on se contentera de vérifier par la suite que cela correspond bien aux résultats obtenus par modélisation.

2) Extrapolation du modèle du déversoir percé

a) hypothèse

On suppose que sur la parcelle étudiée, les effets d'un apport de débit sont les mêmes quelle que soit la forme de cet apport : pluie ou ruissellement provenant de l'amont.

Autrement dit, le champ $h(x,y)$ est le même dans les deux cas.

A priori, cette hypothèse semble très grossière si l'apport de débit est faible. Dans ce cas, en effet, l'apport sous forme de pluie touche toute la superficie de la parcelle, alors que l'apport sous forme de ruissellement n'intéresse que le fond des rigoles, qui ne représente qu'une petite partie de la surface de la parcelle.

Par contre, si l'apport de débit est important, il n'est pas impossible de penser que la proportion de surface émergée sur la parcelle devient très petite. L'apport sous forme de débit intéresse alors la presque totalité de la surface de la parcelle. On peut supposer dans ce cas que les deux formes d'apports ont des effets comparables.

Cette hypothèse doit donc permettre d'obtenir des ordres de grandeur qui ne sont pas aberrants.

b) Méthode d'extrapolation du modèle

L'extrapolation du modèle se fait de façon très simple, en séparant la parcelle fictive de longueur quelconque en tronçons de longueur 1 mètre (c'est-à-dire la longueur de la parcelle expérimentale).

Lors d'une averse, chaque tronçon reçoit un apport constitué du débit de pluie et du débit ruisselé provenant du tronçon supérieur.

La discrétisation du modèle au pas de temps δt sur une parcelle de longueur 1 se fait alors selon le schéma suivant :

$$t = t_0 = 0 \Rightarrow H_j(t) = 0 \quad \forall j$$

$$\forall t, \quad \forall j = 1, \dots, l :$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_j(t) < H_L \Rightarrow q_{R,j}(t + \delta t) = 0 \\ H_j(t) > H_L \Rightarrow q_{R,j}(t + \delta t) = (H_j(t) - H_L)^{N/2} \\ q_{F,j}(t + \delta t) = S_j \sqrt{2g H_j(t)} \\ H_j(t + \delta t) = \text{Max} \left[0, H_j(t) + \left[\begin{array}{l} Q_I(t + \delta t) + q_{R,j-1}(t + \delta t) \\ - q_{R,j}(t + \delta t) - q_{F,j}(t + \delta t) \end{array} \right] \cdot \delta t \right] \end{array} \right.$$

$$\text{avec : } \left\{ \begin{array}{l} \forall j = 1 \dots l : \left\{ \begin{array}{l} S_j = K_1 \cdot IK_j + K_2 \\ IK_{j, i+1} = (IK_{j, i} + F_{i, j}) e^{-0,5 (t_{i+1} - t_{i, f})} \end{array} \right. \quad \forall i \\ j : \text{numéro d'ordre du tronçon compté de l'amont vers l'aval.} \end{array} \right.$$

Bien sûr, cette extrapolation entraîne l'utilisation des équations (8) et (9) donnant les débits ruisselés et infiltrés, pour des valeurs de lame d'eau en surface bien supérieures à celles à partir desquelles elles ont été déterminées. En effet, l'augmentation du débit ruisselé d'amont en aval, évidente dans le cadre des hypothèses que nous avons faites, entraîne une augmentation de la lame d'eau à la surface du sol.

Cette extrapolation peut paraître un peu hasardeuse, mais encore une fois, nous rappelons que nous ne prétendons obtenir que des ordres de grandeur.

c) résultats obtenus pour une averse d'intensité constante

Le calcul a été effectué avec une intensité de pluie de 100 mm.H^{-1} et on a retenu les valeurs suivantes pour les paramètres du modèle :

$$\begin{array}{l} N = 4,29 \\ H_L = 2,77 \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{valeurs correspondant à la parcelle 5} \end{array} \right.$$

$S = 6,545 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$: valeur correspondant à l'état d'humectation de la parcelle 5 au début de l'averse 4.

On suppose donc ici qu'au début de l'averse, l'état d'humectation du sol est le même du haut en bas de la parcelle. Dans le cas général d'un calcul de reconstitution d'écoulement, on utiliserait la formule (14) permettant d'évaluer l'indice IK à partir des différentes lames infiltrées le long de la parcelle.

Le débit ruisselé obtenu à l'aval de la parcelle fictive, pour une largeur de 1 mètre et différentes longueurs l, est tracé en fonction du temps sur la figure 4.

On constate que le débit ruisselé croît comme prévu avec le temps et avec l'abscisse, et que pour une abscisse donnée, il tend avec le temps vers une limite.

Le débit ruisselé à un instant donné est le même pour toutes les abscisses supérieures à une limite qu'on peut estimer égale à 30 mètres dans cet exemple. Pour ces abscisses, le débit ruisselé limite correspond à une valeur de H pour laquelle le débit infiltré par unité de surface est égal à l'intensité de pluie :

$$q_R = 71,1 \text{ mm/H} \rightarrow H = 9,18 \cdot 10^{-3} \text{ m} \rightarrow q_f = 100 \text{ mm/H}$$

d) résultats obtenus pour des averses à intensité variable

Le calcul a été fait pour les 7 parcelles de Daye. Pour chacune d'elles, le modèle extrapolé a été utilisé en prenant les valeurs de N et H_L caractéristiques de la parcelle, une valeur de S uniforme correspondant à l'état d'humectation de la parcelle expérimentale au début de l'averse 4, et un hyétogramme d'averse égal à celui de cette quatrième averse.

Comme dans le cas de l'averse à intensité constante, on a tracé pour la parcelle fictive de largeur 1 mètre, le débit ruisselé en fonction du temps pour différentes abscisses l. Ce tracé a été fait également en débit ruisselé par unité de surface de la parcelle fictive, ce qui est aussi appelé intensité de ruissellement.

Enfin, sur le tracé en débit ruisselé a été porté le résultat d'une autre modélisation, visant à représenter le cas d'une parcelle de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ sur laquelle serait injecté en permanence à l'amont de la parcelle, en plus de la pluie, un débit ruisselé égal à tout instant au débit ruisselé récupéré à l'aval de la parcelle. Ce calcul a été fait pour permettre l'interprétation des résultats qu'on pourrait obtenir avec un dispositif expérimental (décrit dans la deuxième partie), qui permet un tel recyclage du débit ruisselé.

Le schéma de discrétisation de ce modèle avec recyclage est identique à (12), à l'exception de l'équation donnant la variation du stock en surface, qui devient :

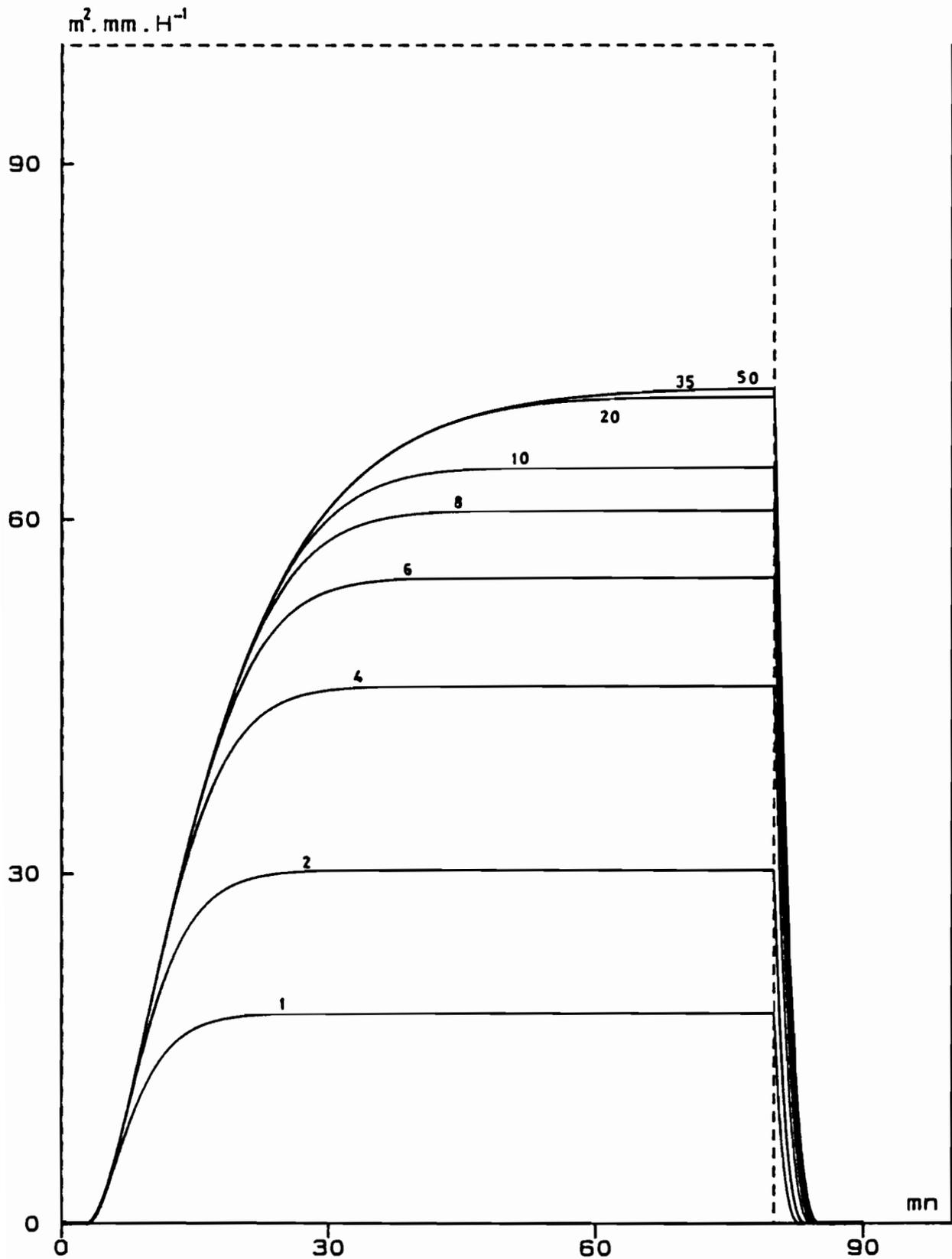
$$H(t + \delta t) = \text{Max} \left[0, H(t) + \left[\begin{array}{l} Q_I(t + \delta t) + q_R(t) \\ - q_R(t + \delta t) - q_f(t + \delta t) \end{array} \right] \cdot \delta t / S_p \right]$$

Tous ces tracés figurent dans l'annexe 3.

Figure 4

parcelle 5 (4eme averse)

Débit ruisselé sur une parcelle de 1 mètre de large



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
----- : hyétogramme d'averse.

On y constate les résultats suivants :

- à tout instant, au cours d'une averse donnée, le débit ruisselé est identique en tous points situés au-delà d'une certaine abscisse. Comptée à partir du sommet de pente, ladite abscisse est croissante avec le temps avant d'atteindre une valeur limite, d'autant plus grande que le sol est plus imperméable. Dans le cas étudié, cette limite varie selon les sols, entre environ 20 mètres (parcelle 5) et 200 mètres (parcelle 1).
- le modèle avec recyclage du ruissellement donne un débit ruisselé identique à tout instant, à celui du modèle extrapolé à une abscisse supérieure à la limite susmentionnée.

Il serait intéressant de pouvoir vérifier mathématiquement que ces résultats essentiels ne dépendent pas du modèle retenu, mais qu'ils sont effectivement vérifiés dès lors qu'on fait l'hypothèse que ruissellement et infiltration sont des fonctions croissantes de la lame d'eau à la surface du sol. Encore une fois, nous ne tenterons pas de résoudre ce problème mathématique, qui dépasse le cadre de cette étude.

Par ailleurs, on a tracé sur la figure 5, les courbes donnant le rapport $L_R(l) / L_R(1)$ en fonction de l pour chacune des parcelles, en notant $L_R(1)$ la lame ruisselée totale relative à l'averse 4 sur une parcelle de longueur 1. Ces courbes sont certes fonction du hyétogramme d'averse et correspondent, on le rappelle, à un cas où l'état d'humectation du sol au début de la pluie est le même tout au long de la parcelle. Ceci doit amener à sous-estimer un peu le débit ruisselé pour les longues parcelles, le sol étant logiquement, dans la réalité, plus humide en bas qu'en haut.

Cependant, les ordres de grandeur étant quand-même probablement significatifs, la figure 5 nous montre que l'on peut être amené à commettre une surestimation importante des lames ruisselées quand on extrapole les résultats obtenus sur une parcelle de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ par la méthode du 'modèle simulateur'. Rappelons que cette méthode consiste à évaluer le volume ruisselé à l'exutoire d'un bassin versant, en sommant les contributions de chaque mètre carré du bassin, celles-ci étant déduites des mesures faites sous pluies simulées. Autrement dit, on fait l'extrapolation comme si chaque mètre carré du bassin ne recevait aucun ruissellement de l'amont, et déversait son propre ruissellement directement dans un réseau de drainage étanche. Ceci correspondrait, avec nos notations, au cas d'un bassin constitué d'unités homogènes (au sens défini plus haut) de longueur $l = 1$ mètre, limitées par un réseau de drainage étanche, pour lequel le volume ruisselé à l'exutoire du bassin pourrait donc être estimé par :

$$L_R(1) \cdot ds$$

Supposons que le réseau de drainage soit effectivement étanche, mais que celui-ci limite des unités de surface homogènes de longueur l (et non plus 1) sur le bassin.

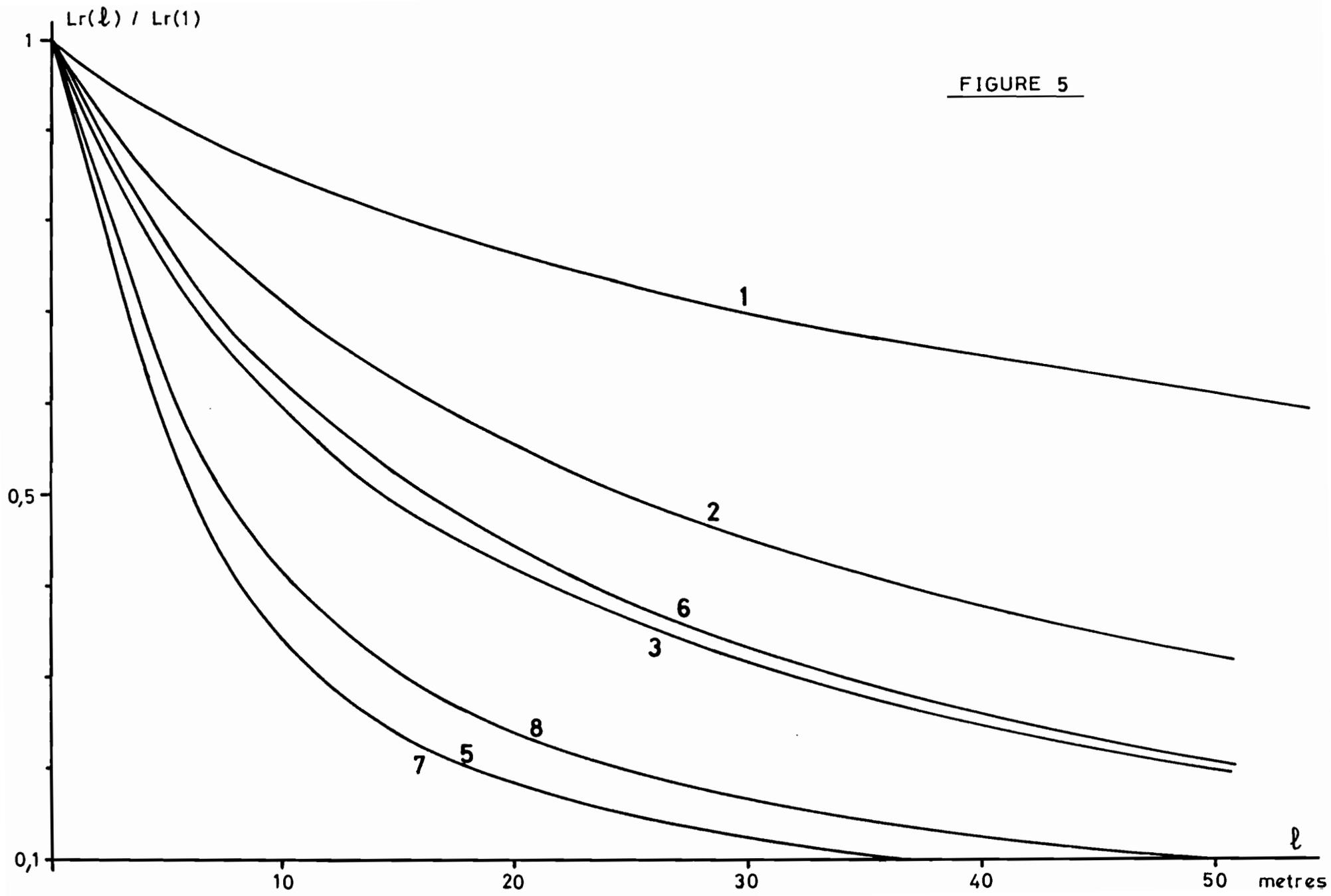
Le volume ruisselé à l'exutoire du bassin peut alors être estimé par l'expression :

$$L_R(l) \cdot ds$$

Ce volume est donc égal à l'estimation faite par le 'modèle simulateur', multipliée par le rapport :

$$L_R(l) / L_R(1)$$

FIGURE 5



La figure 5 montre que ce rapport diminue avec la distance l , d'autant plus rapidement que la parcelle ruisselle peu. La surestimation du ruissellement par le 'modèle simulateur' doit donc être relativement plus forte sur les bassins très perméables.

e) conclusion

Tout ce qui précède montre bien que la non prise en compte des apports de ruissellement provenant de l'amont, dans l'extrapolation des résultats obtenus sur une parcelle de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, peut entraîner des erreurs importantes.

L'utilisation du modèle du déversoir percé extrapolé, esquisse une méthode de calcul qui tiendrait compte de ces apports.

On a vu également que des mesures faites sur une parcelle de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ sur laquelle serait recyclé le ruissellement pourrait donner des indications intéressantes. Un dispositif simple permettant de faire de telles mesures est proposé dans la seconde partie.

Cependant, quelle que soit la méthode utilisée pour tenir compte du phénomène, il est probable que le plus gros problème rencontré sera de déterminer les longueurs l des unités homogènes constituant le bassin versant. Autrement dit, quelle est la distance mesurée le long de la pente, que le ruissellement parcourt sur un sol homogène dont la parcelle de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ peut être jugée représentative, avant d'arriver dans un réseau de drainage ou sur un sol de nature différente, dont le 'fonctionnement' est différent de celui de la parcelle ?

2ème partie

I - Justification d'un recyclage du ruissellement

Considérons un versant homogène, au sens où on l'a défini dans la première partie. On désigne par l l'axe de sa plus grande pente, dirigé vers le bas.

Soit $Q_R(l)$ le débit ruisselé à l'abscisse l sur une largeur de 1 mètre sur le versant. A l'abscisse $l + dl$, on a :

$$Q_R(l + dl) = Q_R(l) + \frac{dQ_R}{dl} \cdot dl$$

Pour une distance dl suffisamment petite, on peut donc faire l'approximation suivante :

$$Q_R(l + dl) \approx Q_R(l)$$

Autrement dit, si on admet que la variation de Q_R sur une distance dl de 1 mètre n'est pas trop grande par rapport à la valeur de Q_R , on peut estimer en première approximation que chaque tronçon de longueur 1 mètre reçoit un apport de débit constitué de :

- un débit de pluie tombant sur la surface du tronçon,
- un débit ruisselé traversant la limite amont du tronçon, égal au débit ruisselé traversant sa limite aval.

D'où l'idée de réinjecter en continu à l'amont, le ruissellement recueilli à l'aval d'une parcelle testée sous pluie simulée. Comme on l'a vu dans la première partie de cette note, on peut s'attendre à ce que le ruissellement recueilli à l'aval d'une telle parcelle à un instant t , soit représentatif du ruissellement le long d'un versant homogène, à l'aval d'une certaine abscisse comptée depuis le sommet de pente. Cette abscisse croît avec le temps, et atteint une limite maximale au bout d'un certain temps.

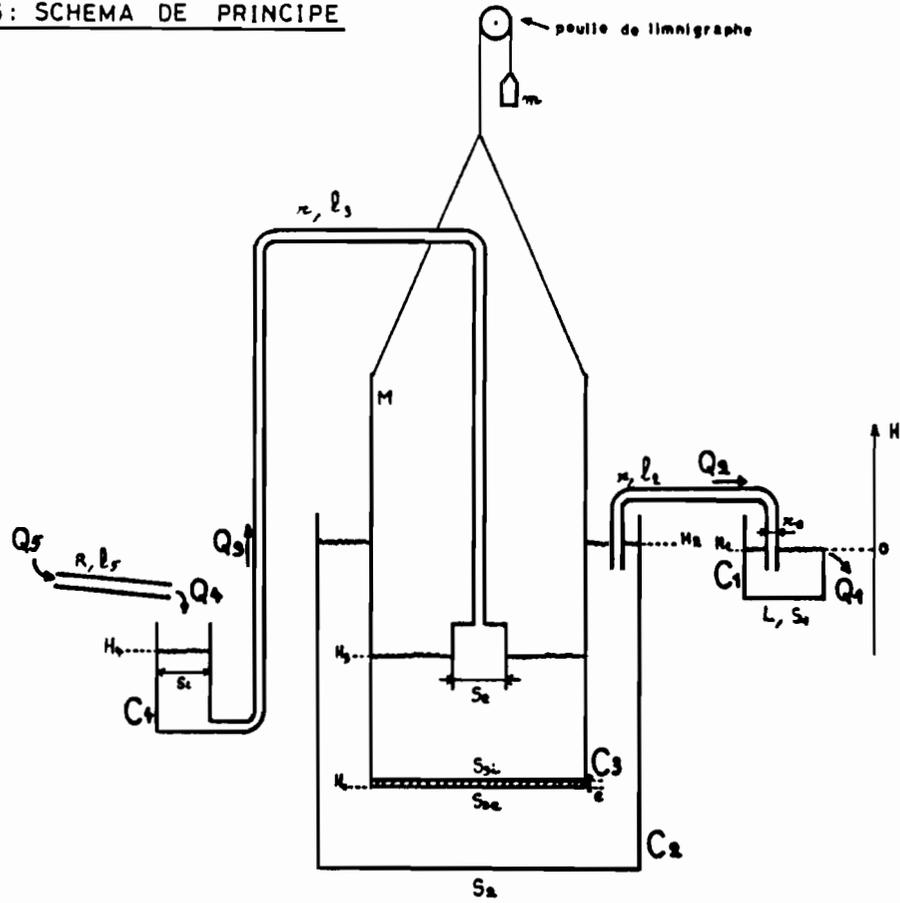
II - Le dispositif de recyclage du ruissellement

1) Principe

Nous avons choisi un système très rustique permettant de faire simultanément la mesure du débit ruisselé et son recyclage en continu.

Il est essentiellement constitué (fig. 6) de 3 cuves cylindriques de section circulaire, C_2 , C_3 et C_4 , et d'une cuve parallélépipédique C_1 , utilisée comme déversoir. La cuve C_3 , utilisée comme flotteur par un limnigraphe OTT 10, flotte dans la cuve C_2 . Le dispositif recueille le débit ruisselé Q_5 à l'aval de la parcelle, et restitue un débit Q_1 à l'amont de celle-ci.

FIG. 6 : SCHEMA DE PRINCIPE



Signification des symboles :

- H_1, H_2, H_3, H_4 : niveau de l'eau dans les cuves C_1, C_2, C_3, C_4 respectivement, le niveau zéro correspondant au seuil du déversoir délivrant le débit Q_1 .
- H_c : niveau extérieur du fond de la cuve C_3 .
- L : longueur du déversoir de la cuve C_1 .
- S_1, S_2, S_{3i}, S_4 : aires intérieures des cuves C_1, C_2, C_3, C_4 respectivement.
- S_{3e} : aire extérieure de la cuve C_3
- S_e : aire extérieure de l'extrémité cylindrique du siphon plongeant dans la cuve C_3 .
- l_2, l_3, l_5 : longueurs respectives des siphons reliant C_1 à C_2 et C_3 à C_4 , et de la goulotte évacuant le ruissellement issu de la parcelle
- r, R : rayons intérieurs respectifs des siphons et de la goulotte.
- r_e : rayon extérieur des siphons.
- M, m : masses respectives de la cuve C_3 et du contrepois relié à cette cuve.
- Q_2, Q_3, Q_4 : débits transités dans les siphons et la goulotte respectivement.
- e : épaisseur du fond de la cuve C_3 .

Le transfert d'un débit dans le dispositif ne peut bien sûr se faire que si :

$$\begin{cases} H_4 > H_3 \\ H_2 > H_1 \end{cases}$$

Cependant, avant d'envisager plus loin le cas général, nous allons considérer le cas d'un transfert de débit constant, suffisamment faible pour qu'on puisse admettre en première approximation que :

$$\begin{cases} H_2 = H_1 = 0 \\ H_4 = H_3 \end{cases}$$

Pour un débit Q_5 constant, la conservation des volumes permet d'écrire en régime établi :

$$Q_1 = - S_{3e} \frac{d H_c}{dt}$$

$$Q_5 = Q_4 = (S_1 + S_{31} - S_e) \frac{d H_3}{dt} - S_{31} \frac{d H_c}{dt}$$

Pour des valeurs faibles de débit, la cuve C_3 peut être considérée comme quasiment en équilibre, d'où :

$$(M - m)g + \rho g (H_3 - H_c - e) S_{31} = \rho g S_{3e} (H_2 - H_c) \text{ avec } \left\{ \begin{array}{l} \rho : \text{masse volumique de l'eau} \\ g : \text{accélération de la pesanteur.} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \rho g \left(\frac{d H_3}{dt} - \frac{d H_c}{dt} \right) \cdot S_{31} = -\rho g S_{3e} \frac{d H_c}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{d H_3}{dt} = \left(1 - \frac{S_{3e}}{S_{31}} \right) \cdot \frac{d H_c}{dt}$$

$$\Rightarrow Q_5 = \left[(S_1 + S_{31} - S_e) \cdot \left(1 - \frac{S_{3e}}{S_{31}} \right) - S_{31} \right] \cdot \left(-\frac{Q_1}{S_{3e}} \right)$$

$Q_5 = \left[1 - \frac{(S_{3e} - S_{31}) \cdot (S_e - S_1)}{S_{31} \cdot S_{3e}} \right] Q_1$	(15)
$Q_1 = - S_{3e} \cdot \frac{d H_c}{dt}$	

Conclusion :

On voit donc que le dispositif recevant le débit Q_5 peut délivrer simultanément un débit Q_1 exactement égal à Q_5 à condition que : $S_e = S_1$. Ce débit transité peut par ailleurs être mesuré par le déplacement de la cuve C_3 , qu'il suffit d'utiliser comme flotteur d'un limnigraphe.

On déduit de (15) que les enregistrements limnigraphiques ainsi obtenus représentent l'intensité de ruissellement Q_5/S_p , multipliée par :

Rapport d'agrandissement = S_p / S_{3e}

2) Dimensionnement

a) principe

Le choix des dimensions des différentes parties du dispositif est guidé principalement par des contraintes pratiques.

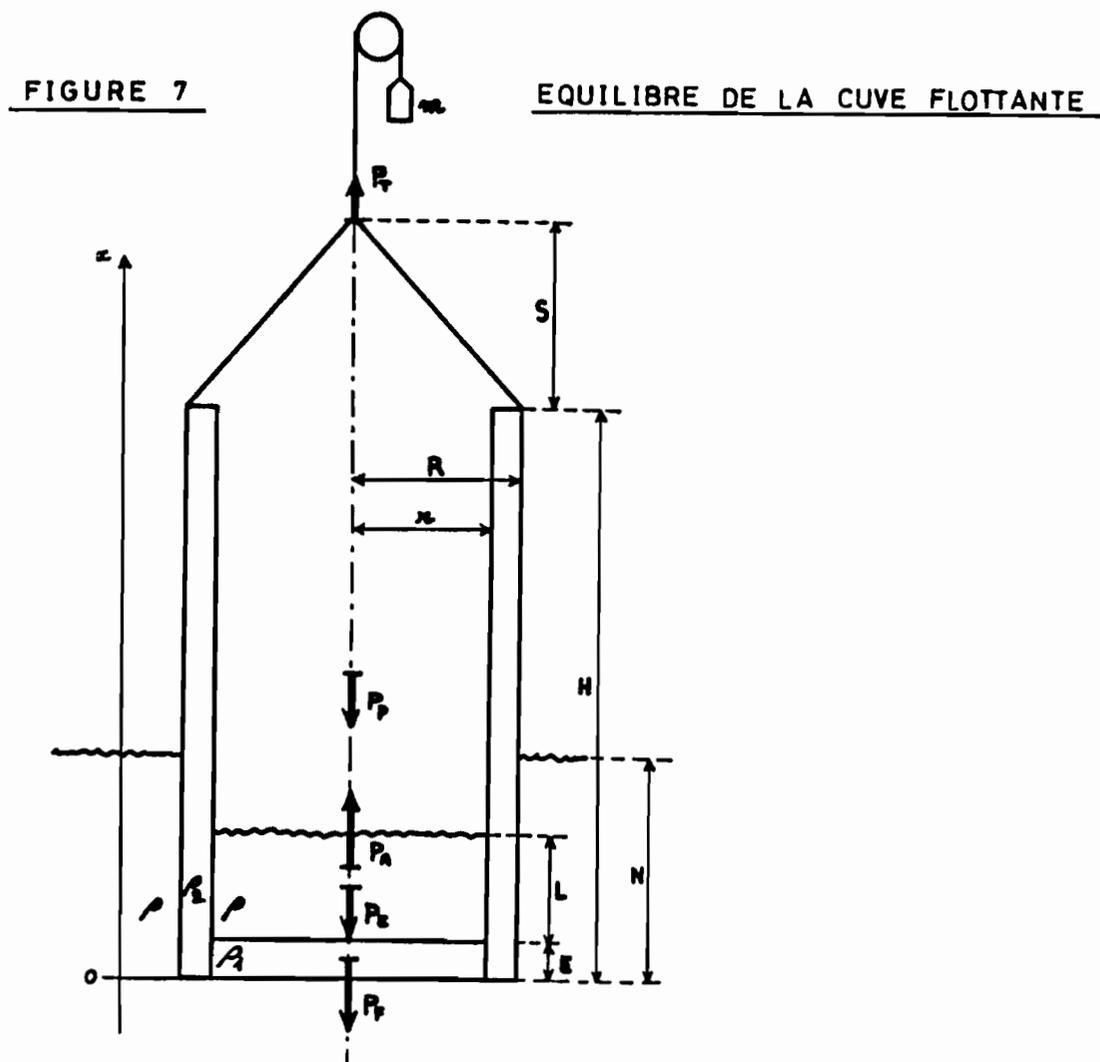
- Ce matériel de terrain doit être facile à manier et à installer, et il doit offrir une bonne sensibilité de mesure. On en déduit la section et la hauteur des cuves C_2 et C_3 , sachant qu'elles sont construites en tôle.

- La longueur des tuyaux constituant les deux siphons doit permettre au circuit de faire le tour de la parcelle de 1 m^2 , en tenant compte de l'encombrement du simulateur de pluie. Les pertes de charge dans ces tuyaux doivent être limitées au maximum.
- La cuve C_1 est dimensionnée de façon à ce que le débit Q_1 se déverse uniformément, et à faible vitesse, sur toute la largeur de la limite amont de la parcelle.
- Les dimensions de la cuve C_4 sont déterminées expérimentalement, de façon que les fluctuations succédant dans cette cuve à une modification importante et instantanée du débit Q_5 , n'entraîne ni débordement ni désamorçage.
- L'épaisseur e du fond de la cuve C_3 , ainsi que la masse m , sont déterminés de façon que la cuve C_3 soit en équilibre vertical stable quel que soit son niveau de remplissage, et que le dispositif offre une dénivellée suffisante entre les niveaux H_1 et H_4 .

On trouvera ci-après le détail du calcul qui permet de déterminer e et m .

b) calcul de e et m

Dans le cas d'un équilibre en position verticale, la cuve flottante, cylindre de section circulaire, est soumise à des forces verticales qui ont toutes leurs points d'application situés sur l'axe de symétrie (fig. 7).



On note :

ρ : masse volumique de l'eau

ρ_1 : masse volumique du fond de cuve

ρ_2 : masse volumique des parois de cuve

P_T : traction exercée par le contrepoids de masse m

P_p : poids des parois de la cuve

P_E : poids du fond de la cuve

P_r : poids de l'eau dans la cuve

P_A : poussée d'Archimède.

L'expression des différentes forces est donnée dans le tableau 6.

Tableau 6

Force	Sens de la force	valeur absolue	abscisse du point d'application sur l'axe
P_T	haut	mg	$H + S$
P_A	haut	$\pi R^2 N \rho g$	$N/2$
P_p	bas	$\pi (R^2 - r^2) H \rho_2 g$	$H/2$
P_E	bas	$\pi r^2 L \rho g$	$E + L/2$
P_r	bas	$\pi r^2 E \rho_1 g$	$E/2$

L'équilibre de la cuve est obtenu pour : $P_T + P_A = P_p + P_E + P_r$

$$\iff m + \pi [R^2 N \rho - (R^2 - r^2) H \rho_2 - r^2 L \rho - r^2 E \rho_1] = 0$$

$$\iff \boxed{m + \pi [R^2 (N \rho - H \rho_2) + r^2 (H \rho_2 - L \rho - E \rho_1)] = 0} \quad (16)$$

Une condition suffisante pour que l'équilibre soit stable, est que le point d'application des forces vers le haut soit situé au-dessus du point d'application des forces vers le bas :

$$x_{\text{haut}} = \frac{m (H + S) + \pi R^2 N^2 \rho / 2}{m + \pi R^2 N \rho}$$

$$x_{\text{bas}} = \frac{\pi [(R^2 - r^2) H^2 \rho_2 + r^2 L \rho (2E + L) + r^2 E^2 \rho_1] / 2}{\pi [(R^2 - r^2) H \rho_2 + r^2 L \rho + r^2 E \rho_1]}$$

D'après (16), les dénominateurs sont égaux et donc :

$$x_{\text{haut}} > x_{\text{bas}} \Leftrightarrow K = 2 m (H+S) + \pi [R^2 N^2 \rho - (R^2 - r^2) H^2 \rho_2 - r^2 L \rho (2E+L) - r^2 E^2 \rho_1] > 0$$

Examinons maintenant les variations de K liées aux variations de N et L, toutes les autres variables étant constantes :

$$\frac{dK}{dt} = \frac{\partial K}{\partial N} \cdot \frac{dN}{dt} + \frac{\partial K}{\partial L} \cdot \frac{dL}{dt} = \left(\frac{\partial K}{\partial L} + \frac{\partial K}{\partial N} \cdot \frac{\partial N}{\partial L} \right) \cdot \frac{dL}{dt}$$

Le terme $\frac{\partial L}{\partial N}$ est obtenu à partir de (16) : $\frac{\partial N}{\partial L} = \frac{r^2}{R^2}$

$$\Rightarrow \frac{dK}{dt} = \pi \left[2R^2 \rho N \frac{r^2}{R^2} - r^2 \rho (2E + 2L) \right] \cdot \frac{dL}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{dK}{dt} = 2 \pi r^2 \rho [N - E - L] \cdot \frac{dL}{dt}$$

Par conséquent, K varie dans le même sens que L, et une condition nécessaire et suffisante pour que K soit toujours positif, est que K soit positif pour la valeur minimale de L devant être atteinte - soit L_0 . Donc :

$$K(L_0) = 2m (H+S) + \pi \left[\frac{1}{R^2 \rho} \left[(R^2 - r^2) H^2 \rho_2 + r^2 (L_0 \rho + E \rho_1) - \frac{m}{\pi} \right]^2 - (R^2 - r^2) H^2 \rho_2 - r^2 L_0 \rho (2E + L_0) - r^2 E^2 \rho_1 \right] \quad (17)$$

$K(L_0) > 0 \Rightarrow$ équilibre stable $\forall L > L_0$

En pratique, on prendra pour L_0 la valeur minimale pour laquelle le siphon ne risque pas de se désamorcer ($L_0 = 3$ cm).

L'application numérique de ce calcul, ainsi que le calcul de la dénivelée $H_2 - H_3$ correspondante, se trouvent dans l'annexe 4.

c) dimensions retenues

Les plans de l'annexe 5 donnent le détail de la plupart des éléments. On trouvera ci-dessous les principales dimensions retenues.

- cuve C2 : cylindre de section circulaire, tôle de 1 mm, hauteur 80 cm, diamètre 44,2 cm.

- cuve C3 : cylindre de section circulaire, tôle de 1 mm, hauteur 80 cm, diamètre 32 cm. Cette cuve est supportée par trois brins de cablette de 22,6 cm dont les points d'attache sont séparés de 120° sur les bords de la cuve. L'épaisseur du fond e et la masse m, déterminés dans l'annexe 4, sont : $m = 2\,448$ g ; $e = 1$ cm.

- cuve C1 : parallélépipède de longueur $L = 1$ m ; largeur = 5 cm ; profondeur = 4 cm.

- cuve C4 : tube PVC de diamètre intérieur 58 mm, hauteur 36 cm.

- Siphon C4-C3 : longueur totale $l_3 = 9,50$ m (11,50 m pour les essais). Tuyau souple de rayon intérieur $r = 12,25$ mm. L'extrémité plongeant dans la cuve C3 est en tube PVC de diamètre intérieur 58 mm, extérieur 63 mm.

- Siphon C₂-C₁ : longueur totale l₂ = 3 m. Tuyau souple de rayon intérieur r = 12,25 mm. Les deux extrémités sont en PVC rigide de diamètre intérieur 28 mm, et extérieur 32 mm.

- goulotte : tube PVC de rayon intérieur 18 mm, longueur l₅ = 1,5 m.

Remarque : les siphons C₂-C₁ et C₄-C₃ sont chacun équipé d'une vanne qu'on utilise lors de la mise en place du dispositif.

3) Fonctionnement

L'étude détaillée du fonctionnement du dispositif est faite dans l'annexe 6. On en retiendra les résultats suivants :

- En régime permanent, le débit Q₁ sortant du système est égal au débit Q₅ entrant, si et seulement si :

$$S_0 = S_1$$

On retrouve donc bien le résultat qui avait déjà été établi en faisant l'hypothèse d'égalité des niveaux dans les cuves.

- Le transfert d'un débit Q dans le dispositif s'accompagne de l'apparition de dénivellées non nulles entre H₄ et H₃ d'une part, et entre H₂ et H₁ d'autre part. Ces dénivellées représentent, avec le volume présent dans la goulotte, un stockage V dans le système, dont la valeur est une fonction croissante de Q.

Un ordre de grandeur de la fonction V (Q), évalué moyennant certaines hypothèses simplificatrices, est reporté sur la figure A de l'annexe 6.

On retiendra :

$$Q = 140 \text{ mm}^2 \text{ mm H}^{-1} \longrightarrow V = 0,52 \text{ litre.}$$

Afin que le dispositif de recyclage n'introduise pas une inertie sensible dans la transmission des variations de débit ruisselé, il est nécessaire que le volume V stocké dans le dispositif soit bien inférieur au volume V_p correspondant au stockage de surface sur la parcelle à tester.

Ce volume V_p correspond à l'augmentation de la lame d'eau à la surface de la parcelle, pour passer d'un ruissellement tendant vers zéro, à une valeur de ruissellement donnée.

En admettant que le modèle du déversoir percé représente bien la réalité, le volume V_p peut être évalué pour les parcelles de Daye utilisées dans la première partie par :

$$V_p = (H - H_L) \cdot S_p.$$

Le tableau 5 nous montre que les valeurs de V_p relatives aux débits ruisselés maximaux observés, valent au moins 3 litres pour toutes les parcelles. Or ces débits maximaux sont tous inférieurs à 140 mm.m².H⁻¹. On en conclue donc que le volume V_p correspondant à un ruissellement de 140 mm H⁻¹, est supérieur à 3 litres pour les parcelles testées.

On peut donc espérer que le volume V stocké dans le dispositif de recyclage sera en général bien plus faible que le volume V_p stocké en surface des parcelles à tester.

- Le dispositif introduit donc une certaine inertie dans le transfert d'une modification de débit de l'amont vers l'aval. Cette inertie peut être évaluée en examinant la courbe $Q_s(t)$ donnant le débit sortant du dispositif pour un échelon de débit Q_e en entrée :

$$\left| \begin{array}{l} t = 0 \Rightarrow Q_e = Q_s = 0 \\ t > 0 \Rightarrow Q_e = C^{te} > 0 \end{array} \right.$$

Les courbes $Q_s(t)$ relatives à différentes valeurs d'échelon Q_e sont représentées sur la figure B de l'annexe 6. On y constate que le temps de réponse du système, tel que le débit sortant devienne quasiment égal au débit entrant, est d'environ une demi minute.

Ce temps de réponse correspond à des conditions de variation très brutale du débit entrant, qui ne seront pas rencontrées lors des expérimentations. Il est, malgré cela, négligeable en comparaison de la durée des averses simulées.

Conclusion - Les résultats qui précèdent montrent que le dispositif permet de délivrer à l'amont d'une parcelle, un débit Q_s égal à tout instant au débit Q_e ruisselé à l'aval. Les variations de Q_e sont retransmises sur Q_s avec une inertie probablement négligeable.

4) Essais du dispositif

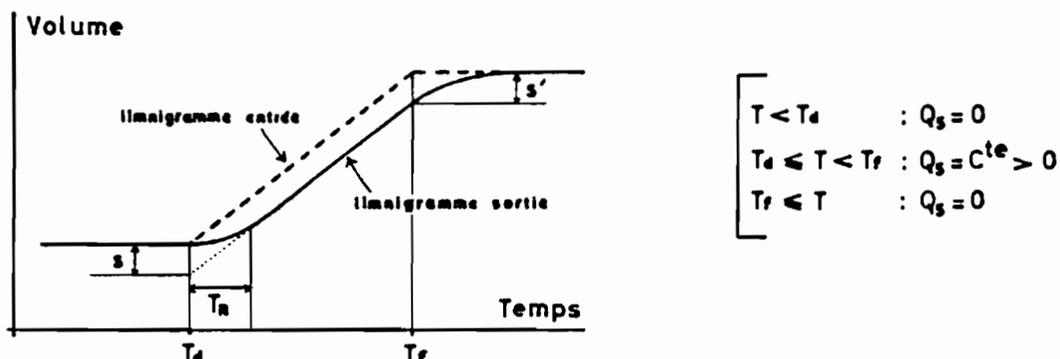
Pour faire les essais, le dispositif de recyclage, conforme au schéma de principe de la figure 6, déversait le débit Q_1 dans un collecteur identique à ceux qui sont placés habituellement à l'aval des parcelles de 1 m².

Le circuit ainsi constitué était donc conforme à la totalité du circuit extérieur de recyclage d'une parcelle, au détail près (sans importance) que le collecteur était situé à l'aval au lieu d'être à l'amont.

Les essais ont consisté à déverser dans la goulotte, un débit Q_5 sous forme de paliers constants séparés de débits nuls. Ce débit Q_5 était délivré par un dispositif calibré donnant un taux d'imprécision inférieur à 2 %.

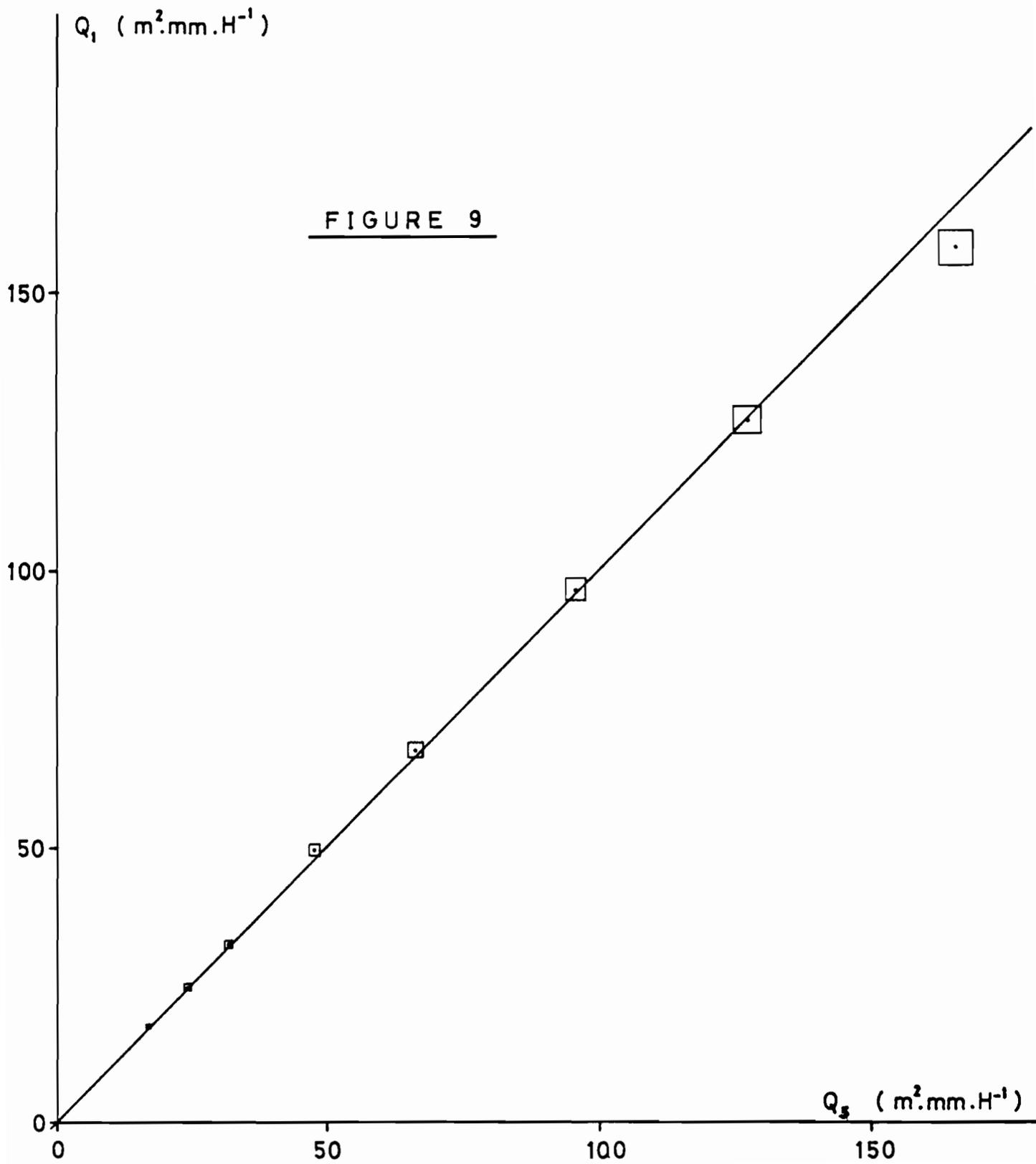
Le débit Q_1 sortant à l'aval de ce dispositif tombait directement dans une cuve surmontée d'un limnigraphe à flotteur OTT 8. Les enregistrements ainsi obtenus présentent pour chaque palier la forme schématisée sur la figure 8 :

FIGURE 8



On a reporté sur la figure 9, les valeurs du débit sortant Q_1 stabilisé, en fonction du débit Q_5 des paliers en entrée. On constate comme prévu l'égalité :

$$Q_1 (\text{stabilisé}) = Q_5$$



Le volume V stocké dans l'ensemble du circuit de recyclage pour les différentes valeurs de débit transité, peut être facilement évalué à partir des enregistrements. Sur la figure 8, la dénivelée S représente le stockage de ce volume, et S' son destockage. Pour chaque débit entrant Q_5 testé, les valeurs S et S' , estimées ainsi à 0,05 litre près, sont égales.

La figure 10 montre les variations de V avec Q_5 . On y constate que ces valeurs expérimentales valent environ 2 fois les valeurs théoriques portées sur la figure B de l'annexe 6. Ceci peut s'expliquer par le fait que le calcul théorique a été fait moyennant certaines approximations, et qu'il n'y était pas tenu compte d'éventuelles pertes de charge singulières dues par exemple à la présence de coudes et de vannes dans le circuit, ou à des déformations des tuyaux souples. Ce calcul ne prenait pas non plus en compte la présence du collecteur destiné à recueillir le ruissellement à l'aval de la parcelle.

Quoi qu'il en soit, les valeurs de V obtenues (par exemple : 1 litre pour $Q_5 = 140 \text{ m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{H}^{-1}$), restent encore faibles en comparaison des stockages en surface de parcelle auxquels on peut s'attendre. S'il s'avérait toutefois que V était trop grand, il serait possible de le faire diminuer de façon importante en augmentant la section du tuyau reliant les cuves C_1 et C_2 . Ceci aurait également pour effet de faire diminuer le temps de réponse du circuit de recyclage. Tel qu'il a été défini plus haut, celui-ci correspond à l'intervalle de temps T_R noté sur la figure 8. Les valeurs de T_R , estimées à 10 secondes près sur les enregistrements, valent environ 40 secondes pour toutes les valeurs de débit transité testées.

Les enregistrements effectués pendant les essais, sur le limnigraphe OTT 10 utilisant la cuve C_3 comme flotteur, donnent un limnigramme identique à celui du débit Q_1 enregistré à la sortie du circuit, à la différence près qu'il présente un temps de réponse un peu plus faible que ce dernier.

On constate comme prévu (équation (15)) que ces enregistrements permettent d'évaluer le débit Q_5 , avec un rapport d'agrandissement égal à la section de la cuve C_3 (valeur trouvée : 791 cm^2 au lieu de 794 cm^2 théorique).

Conclusion - Les tests confirment que le dispositif de recyclage proposé permet de délivrer à l'amont d'une parcelle un débit égal à celui sortant à l'aval de la parcelle. Les variations du débit sortant de la parcelle sont retransmises au débit réinjecté avec une faible inertie, qui pourra encore être diminuée moyennant l'utilisation de tuyaux de plus grande section dans le circuit. Simultanément au recyclage du débit ruisselé de la parcelle, le dispositif en fait également la mesure.

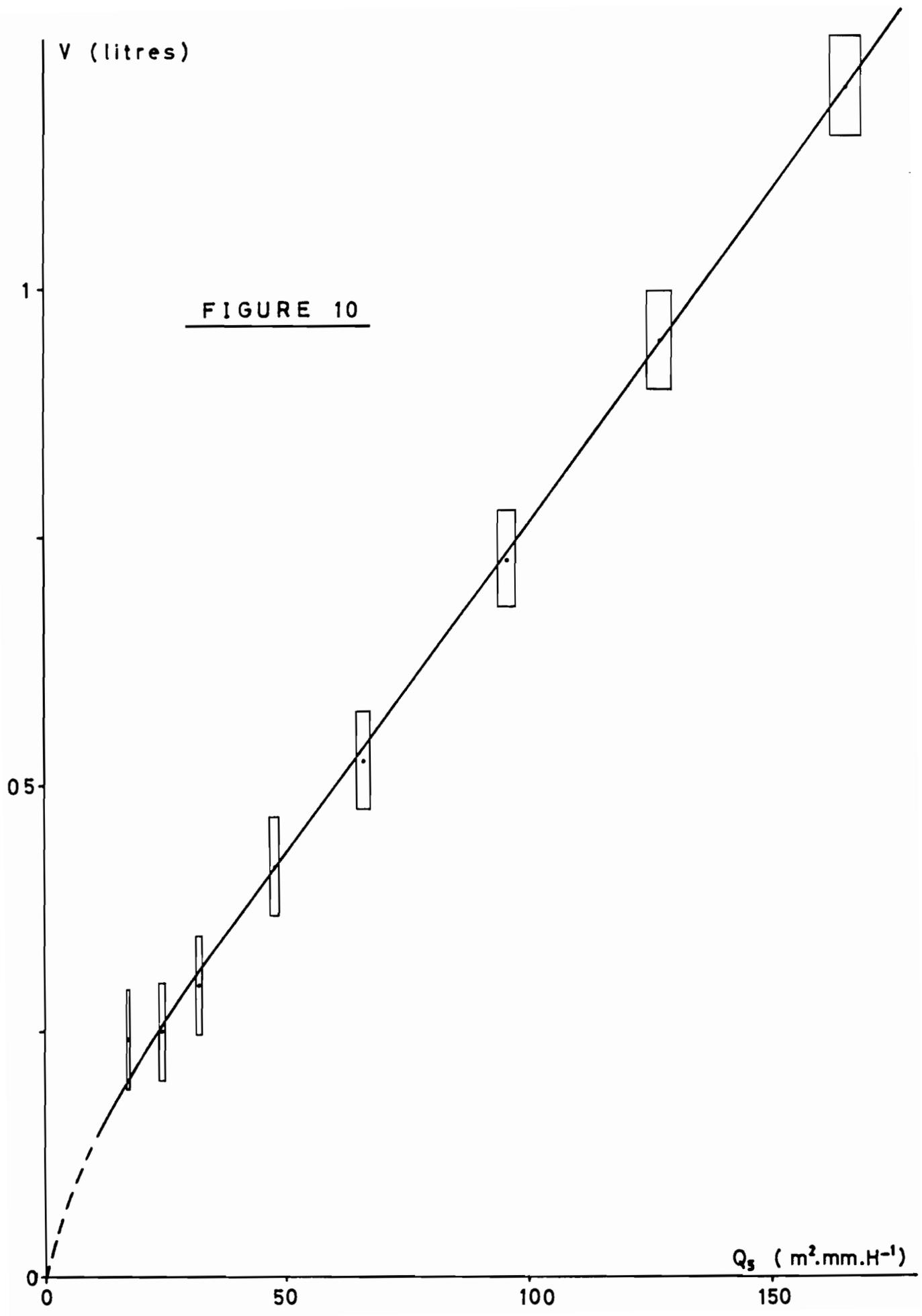


FIGURE 10

III - Premiers essais de terrain

Une parcelle implantée sur terre de barre, en jachère récemment brûlée, a été testée sous pluie simulée avec recyclage du ruissellement. Le dispositif de recyclage a pu ainsi être testé en vraie grandeur.

1) Procédure d'installation

L'installation du simulateur de pluie se fait comme habituellement. Pour installer le dispositif de recyclage, il est nécessaire de suivre la liste d'opérations suivante, afin d'éviter d'éventuels tâtonnements dans le réglage des niveaux.

- 1 - Mise en place de la cuve C₂, à une distance d'environ 2,5 m du bord amont de la parcelle. Le haut de la cuve, horizontal, doit être environ 4 cm au-dessus du niveau de la bordure supérieure du cadre à l'amont de la parcelle.
- 2 - Mesurer la dénivelée p sur le bord supérieur du cadre, entre les côtés amont et aval de la parcelle. Placer au fond de la cuve C₃, le nombre de plaques déduit de la valeur de p, conformément aux indications fournies à la fin de l'annexe 4.
- 3 - Mettre la cuve C₃ dans la cuve C₂ ; verser de l'eau dans C₃ jusqu'à ce que le niveau dépasse les plaques d'environ 4 cm.
- 4 - Mettre en place le limnigraphe et attacher la cuve C₃ et le contrepoids aux extrémités de la cablette.
- 5 - Remplir la cuve C₂ jusqu'à environ 3 cm du bord.
- 6 - Remplir d'eau le siphon C₄ C₃, fermer sa vanne et boucher ses extrémités. Idem pour le siphon C₁ C₂.
- 7 - Mise en place de la cuve C₄, à une distance de l'aval de la parcelle correspondant à la longueur de la goulotte. Le bord supérieur de C₄ doit être situé à environ 6 cm en dessous du niveau de sortie du collecteur de parcelle.
- 8 - Mise en place du siphon C₃ - C₄ dans la cuve C₃. Le tuyau doit s'enfoncer dans l'eau un peu au-dessus de la limite du bouchon. Fixer le tuyau sur le support à l'aide du boulon de serrage. Déboucher le tuyau à l'aide d'un fer plat plié à angle droit.
Si des bulles d'air se trouvent dans le tuyau, les chasser par la cuve C₄.
- 9 - Mise en place du déversoir C₁ à l'écart de la parcelle, afin que puisse être évacué le ruissellement correspondant à l'étalonnage des intensités du simulateur. Le seuil du déversoir, horizontal, doit être à environ 1 cm au-dessus du niveau du bord supérieur du cadre à l'amont de la parcelle. Remplir C₁ d'eau.
- 10- Mise en place du siphon C₁ C₂ et débouchage des extrémités.
- 11- Mise en place du système de vidange : Le tuyau d'aspiration, avec sa vanne fermée, est plongé sur environ 2 cm dans l'eau de la cuve C₃, et fixé sur le support à l'aide du boulon de serrage. Le tuyau de refoulement est plongé dans la cuve C₂.
- 12- Après l'ouverture des vannes des deux siphons, on peut procéder à l'étalonnage des intensités délivrées par le simulateur, comme habituellement.

- 13- A la fin des essais d'intensité, et éventuellement pendant, vidanger la cuve C₃ en ne dépassant pas une lame d'eau minimale de 3 cm au-dessus des plaques. Les manoeuvres de la vanne située sur le tuyau d'aspiration doivent être bien synchronisées avec la mise en marche et l'arrêt de la motopompe, pour éviter un risque de siphonage entre C₃ et C₂.
- 14- Fermer la vanne du siphon C₂ C₁, et boucher son extrémité dans C₁.
- 15- Mettre en place le déversoir C₁ sur le bord amont du cadre. Le seuil doit être parfaitement horizontal, et placé le plus bas possible.
- 16- Remettre en place le siphon C₁ C₂, et déboucher son extrémité dans C₁.
- 17- Placer une bande de mousse sous le seuil du déversoir C₁, afin de protéger la parcelle d'éventuels débordements lors de l'ajustement des niveaux.
- 18- Ouvrir la vanne du siphon C₁ C₂. Le niveau dans C₁ doit atteindre tout juste le seuil de débordement. L'ajuster s'il le faut.
- 19- Mise en place de la goulotte. Colmater si possible le raccordement au niveau de la sortie du collecteur avec de la pâte à modeler. Sans cette précaution, de fortes valeurs de ruissellement, envisageables avec le recyclage, pourraient entraîner des fuites à ce niveau.
Remplir d'eau le décanteur situé au bout de la goulotte.
- 20- Procéder aux mesures.

Comparé à l'installation de l'appareillage classique, et hors le creusement du trou destiné à recevoir la cuve C₂, il faut prévoir environ trois quarts d'heure supplémentaires pour l'installation du dispositif de recyclage.

2) Résultats obtenus

Quatre averses à intensité constante ont été simulées sur la parcelle :

averse	1	2	3	4
date	27.2 à 13H50	28.2 à 9H05	1.3 à 8H40	7.3 à 11H13
intensité (m ² .mm.H ⁻¹)	84,2	106	98,0	142
durée (mn)	90	96	60	28

Averse 1 : aucun ruissellement

Averse 2 : faible ruissellement, stabilisé à 5 m².mm/H.

Averse 3 : après 12 minutes d'averse, le ruissellement se stabilise aux environs de 200 m².mm.H⁻¹, avant d'être perturbé pendant la seconde moitié de l'averse par un vent assez fort, qui fausse l'intensité de pluie délivrée (absence de bâches protectrices sur le bâti du simulateur).

Averse 4 : Avant l'averse d'intensité 142 mm/H, deux averses de 15 minutes et d'intensité 83 mm/H ont été simulées sur la parcelle, suivies chacune d'un temps de ressuyage de 15 minutes. Le but de ce protocole était de favoriser un fort ruissellement pendant l'averse principale, pour laquelle le débit ruisselé obtenu est représenté en fonction du temps sur la figure 11.

Au cours de l'averse, trois vidanges de la cuve C3 dans C2 ont été effectuées. Le circuit de vidange étant rempli d'eau en permanence, le recyclage du débit ruisselé s'effectue théoriquement de façon normale pendant ces opérations. Aucune perturbation n'a d'ailleurs été observée, suite à ces vidanges. Par contre, les fortes valeurs de ruissellement obtenues pendant l'averse ont entraîné un transport solide assez important, qui a pour effet de boucher des orifices de la limite aval de la parcelle. Il en résulte une augmentation de la lame d'eau en surface et, subséquemment, une augmentation artificielle de l'infiltration. L'importance du transport solide a par ailleurs entraîné un remplissage complet du décanteur, qui a eu pour conséquence de permettre un bouchage partiel du siphon C4 C3 par les sédiments.

Mises à part ces perturbations dues à l'érosion (faciles à résoudre techniquement, en modifiant les orifices à l'aval de la parcelle et en augmentant la taille du décanteur), le ruissellement s'est rapidement stabilisé aux environs de $300 \text{ m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{H}^{-1}$. Ceci est conforme aux résultats prévus par modélisation numérique dans la première partie.

Enfin, on a constaté que l'injection du ruissellement à l'amont de la parcelle se fait bien sur toute la largeur, sans entraîner de modification locale remarquable du sol.

Remarque : le linnigramme correspondant à la figure 11 a été enregistré sur OTT 10, avec un défilement de 8 mm par minute (très satisfaisant), et un rapport de réduction de 5. Si on admet que le dépouillement peut être fait avec une précision de 0,2 mm sur ce diagramme, l'imprécision sur le calcul des intensités moyennes sur 1 minute (fig. 11) vaut donc :

$$0,2 \times 5 \times 0,0794 \times 2 \times 60 = 9,5 \text{ m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{H}^{-1}$$

La solution idéale consisterait à utiliser un rapport de réduction de 2 qui, sans entraîner de retournement sur le diagramme, permettrait de ramener cette imprécision à : $3,8 \text{ m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{H}^{-1}$.

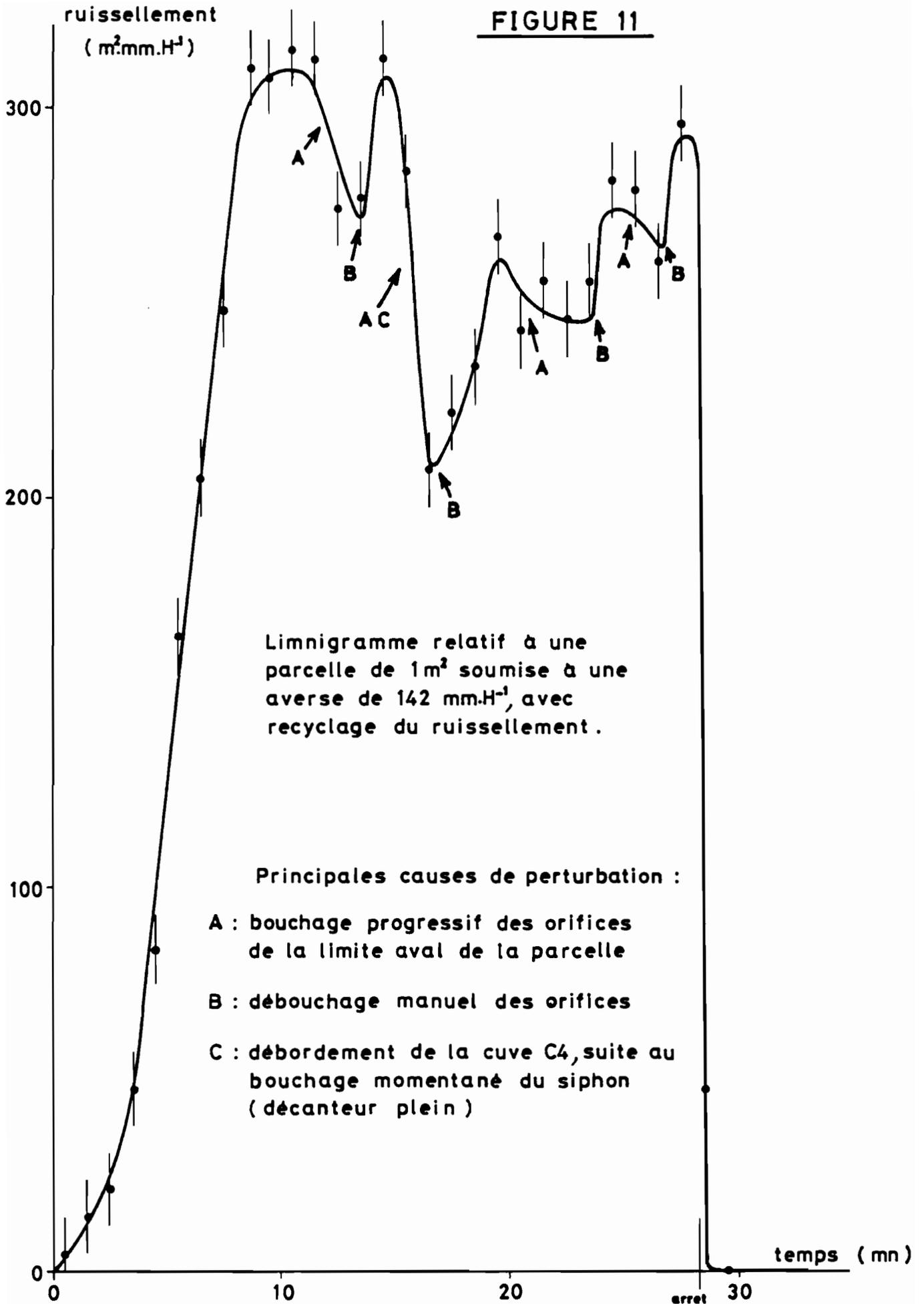
IV - Conclusion

Le dispositif proposé permet de reproduire de façon assez satisfaisante les phénomènes qui se produiraient sur une pente homogène, lors d'une averse également homogène, à l'aval d'une certaine abscisse (comptée depuis le sommet de pente), qui augmente avec le temps pendant l'averse.

Les variations de cette abscisse, ainsi que la limite maximale qu'elle atteint à partir d'un certain temps pendant l'averse, dépendent du hyétogramme. Nous ne savons pas, pour le moment, les déduire des mesures effectuées avec un tel protocole. Là encore se pose un problème mathématique complexe, qu'on pourra essayer de résoudre en faisant intervenir la vitesse de ruissellement, mesurable pendant l'expérimentation.

Mais d'ores et déjà, on peut envisager d'utiliser ce procédé de façon très profitable, pour vérifier l'extrapolation d'un modèle de ruissellement le long d'une pente homogène, au-delà de la limite à partir de laquelle le ruissellement est uniforme à tout instant d'une averse donnée.

FIGURE 11



Selon les sols et selon l'averse, cette limite au-delà de laquelle la lame infiltrée est égale à la hauteur d'averse, peut être plus ou moins grande et dépasser éventuellement les distances séparant les sommets de pente du réseau de drainage. Mais même dans une telle éventualité, le procédé est d'un grand intérêt, puisque si l'extrapolation d'un modèle à une certaine abscisse est conforme aux mesures, on peut espérer qu'elle soit correcte pour des abscisses inférieures.

Bibliographie

- 1 - LAFFORGUE (A.) - 1977 - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles - in Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, volume 14, n° 4, pp. 299-344.
- 2 - BADER (J.-C.) - 1985 - Etude du ruissellement sous pluie simulée sur les bassins versants du lac Elia et de la Daye à Dzogbegan - Togo - Centre ORSTOM de Lomé.
- 3 - CASENAVE (A.) - 1982 - Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principe de l'interprétation des mesures - in Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, volume 19, n° 4.
- 4 - SERVAT (E.), DEZETTER (A.) - 1988 - Deux méthodes d'optimisation non linéaire (Rosenbrock - Nelder et Mead). Théorie et pratique. Centre ORSTOM de Montpellier.
- 5 - CARLIER (M.) - 1980 - Hydraulique générale et appliquée - Eyrolles Ed. - Paris.

A N N E X E 1

Résultats obtenus pendant la campagne de simulation de pluie sur le bassin de la Daye à Dzogbegan

Les dix parcelles testées étaient réparties par groupes de deux, sur cinq sites représentant les différents types de sols rencontrés sur le bassin.

Site 1 (parcelles 1 et 2) : sol lithique sur quartzite fragmentée

Site 2 (parcelles 3 et 4) : sol ferrallitique modal sur quartzite

Site 3 (parcelles 5 et 6) : sol ferrallitique rajeuni sur quartzite

Site 4 (parcelles 7 et 8) : sol ferrallitique rajeuni sur micaschiste

Site 5 (parcelles 9 et 10) : sol d'apport colluvial faiblement hydromorphe.

parcelles implantées sur végétation naturelle : 1, 2, 4, 5, 7, 9, 10

parcelles implantées sur brûlis : 6, 8

parcelles implantées sur cultures : 3

La description détaillée de ces parcelles figure dans le rapport suivant :

J.L. JANEAU - Compte rendu de mission au Togo du 5 au 19 Mai 1986, ORSTOM - Centre d'Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire) - 1986.

PARCELLE 1

AVERSE 1 de 106,8 mm le 16/01/85 à 8h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 61.0 138.0 130.0 100.0 82.0 40.0
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 0 secondes) :

0.00 0.00 0.01 0.03 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.09 0.10 0.11 0.13 0.42
 1.14 1.89 2.65 5.55 9.50 13.47 17.37 20.83 24.27 27.68 31.00 33.52 35.70 37.90
 40.09 41.78 43.24 44.72 46.15 46.81 46.95 47.01 47.07 47.07

AVERSE 2 de 74,7 mm le 19/01/85 à 10h40mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 49.0 145.0 107.0 73.0 42.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.40 9.20

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.12 0.40 0.85 1.39 3.62 7.95 12.36 16.78 19.70
 22.30 24.76 27.27 29.03 30.36 31.65 32.90 33.83 34.17 34.37 34.54 34.58 34.58

AVERSE 3 de 71,0 mm le 20/01/85 à 15h10mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.0 50.0 136.0 99.0 72.0 40.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.00 0.01 0.06 0.16 0.49 0.94 1.53 3.85 8.23 12.66 17.22 20.51
 23.35 26.20 29.16 31.15 32.69 34.18 35.78 36.59 36.90 37.18 37.42 37.49 37.49

AVERSE 4 de 73,7 mm le 21/01/85 à 17h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 31.0 52.0 146.0 100.0 70.0 41.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.30 9.30 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.00 0.00 0.04 0.12 0.39 0.76 1.27 3.73 8.32 13.10 17.79 21.36
 24.22 27.27 30.23 32.28 33.97 35.62 37.24 38.21 38.73 39.17 39.60 39.70 39.70

AVERSE 5 de 70,3 mm le 22/01/85 à 11h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 50.0 138.0 96.0 68.0 40.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.09 0.29 0.66 1.13 3.35 7.51 11.87 16.18 19.12
 21.80 24.64 27.50 29.29 30.72 32.11 33.47 34.33 34.76 35.09 35.37 35.47 35.47

AVERSE 6 de 106,7 mm le 23/01/85 à 5h20mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.0 59.0 146.0 125.0 100.0 83.0 40.0
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.02 0.06 0.11 0.18 0.27 0.38 0.53 0.67 0.88 1.09 1.33 2.03
 3.27 4.63 6.06 9.26 14.48 19.62 25.00 29.38 33.52 37.70 41.97 45.40 48.42 51.39
 54.39 56.84 58.91 61.04 63.17 64.38 64.98 65.47 65.94 66.08

PARCELLE 2

AVERSE 1 de 99,8 mm le 16/01/85 à 12h35mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 31.0 61.0 107.0 81.0 43.0
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 30.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.24
0.48	0.72	1.02	1.87	3.44	5.12	6.98	8.93	11.07	13.12	15.23	17.43	19.64	21.94
24.39	25.81	26.76	27.66	28.56	28.97	29.00	29.01	29.01					

AVERSE 2 de 73,3 mm le 19/01/85 à 8h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 52.0 145.0 100.0 70.0 43.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.08	0.12	0.16	0.57	2.03	3.93	6.46	8.29
9.79	11.39	13.06	14.13	14.81	15.48	16.15	16.49	16.61	16.64	16.68	16.69		

AVERSE 3 de 71,0 mm le 20/01/85 à 17h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 49.0 140.0 97.0 70.0 40.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.12	0.62	2.18	4.60	7.48	9.43
11.13	12.94	14.74	16.07	17.04	18.06	19.08	19.71	19.99	20.15	20.28	20.31		

AVERSE 4 de 71,2 mm le 21/01/85 à 15h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.0 50.0 138.0 100.0 70.0 40.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.17	0.89	3.27	6.65	10.28	13.06
15.28	17.45	19.66	21.36	22.73	24.23	25.57	26.36	26.76	27.04	27.29	27.38	

AVERSE 5 de 71,3 mm le 22/01/85 à 13h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.0 50.0 140.0 100.0 70.0 40.0
 durée (mn,s) : 10.30 9.30 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.16	0.94	3.44	6.82	10.63	13.18
15.48	17.67	19.87	21.53	22.79	23.98	25.17	25.89	26.28	26.60	26.87	26.97	26.97	

AVERSE 6 de 104,0 mm le 23/01/85 à 8h00mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 58.0 140.0 118.0 100.0 77.0 41.0
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.13
0.39	0.77	1.28	3.00	6.70	10.86	15.04	18.65	22.02	25.50	29.09	31.96	34.51	37.13
39.70	41.88	43.58	45.24	46.90	47.97	48.47	48.83	49.15	49.27	49.27			

PARCELLE 3

AVERSE 1 de 104.0 mm le 24/01/85 à 9h00mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 61.0 140.0 123.0 100.0 78.0 41.0
 durée (mn,s) : 30.00 10.30 9.30 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.04	0.06	0.07
0.10	0.13	0.17	0.32	0.64	0.93	1.24	1.40	1.50	1.60	1.70	1.79	1.85	1.93
2.01	2.06	2.09	2.12	2.16	2.18	2.20	2.20	2.21					

AVERSE 2 de 72.5 mm le 27/01/85 à 10h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 50.0 146.0 100.0 70.0 39.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.06	0.09	0.11	0.14	0.47	1.50	2.75	4.15	4.66
4.90	5.11	5.41	5.55	5.62	5.68	5.73	5.78	5.79	5.80	5.80			

AVERSE 3 de 71.8 mm le 28/01/85 à 15h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.0 50.0 140.0 102.0 70.0 40.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.08	0.16	0.27	0.34	1.28	3.50	5.80	8.20	9.55
10.66	11.77	13.03	13.73	14.10	14.39	14.70	14.84	14.86	14.87	14.87			

AVERSE 4 de 72.3 mm le 29/01/85 à 17h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 50.0 144.0 100.0 70.0 40.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.14	0.24	0.33	1.55	4.38	7.22	10.30	12.21
13.69	15.34	17.10	18.16	18.88	19.58	20.26	20.66	20.78	20.85	20.91	20.92		

AVERSE 5 de 72.2 mm le 30/01/85 à 11h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 50.0 140.0 102.0 70.0 41.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.09	0.23	0.37	0.54	2.18	5.54	8.92	12.50	14.70
16.66	18.63	20.64	21.94	22.85	23.69	24.65	25.17	25.38	25.51	25.62	25.66		

AVERSE 6 de 107.6 mm le 31/01/85 à 5h20mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.7 61.3 142.0 122.7 105.7 81.1 41.0
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.02	0.06	0.10	0.16	0.23	0.31	0.39	0.49	0.57	0.68	0.77	1.24
2.18	3.19	4.17	6.89	10.75	14.91	19.12	22.47	25.89	29.35	32.75	35.50	38.10	40.85
43.50	45.48	47.17	49.05	50.83	51.84	52.20	52.50	52.77	52.84	52.84			

PARCELLE 5

AVERSE 1 de 104,2 mm le 01/02/85 à 9h00mm (résultats inexploitables)

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) :	31.1	56.7	140.0	120.0	95.3	80.0	40.0
durée (mm,s) :	30.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

AVERSE 2 de 73,2 mm le 04/02/85 à 10h35mm

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) :	30.1	51.2	143.0	102.5	72.3	40.0
durée (mm,s) :	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.13	0.30	0.67	1.34	1.66
1.80	1.98	2.19	2.28	2.32	2.35	2.39	2.42	2.44	2.45	2.46			

AVERSE 3 de 71,2 mm le 05/02/85 à 15h30mm

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) :	30.0	49.1	139.3	100.0	66.7	42.0
durée (mm,s) :	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.06	0.10	0.70	2.00	3.54	4.37
5.09	5.83	6.60	7.02	7.16	7.29	7.42	7.48	7.50	7.51	7.52			

AVERSE 4 de 74,0 mm le 06/02/85 à 17h31mm

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) :	28.5	53.1	140.0	100.5	73.8	40.0
durée (mm,s) :	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.06	0.09	0.13	0.23	1.06	2.60	4.43	5.67
6.69	7.79	8.94	9.64	10.02	10.33	10.61	10.72	10.74	10.76	10.79			

AVERSE 5 de 71,8 mm le 07/02/85 à 11h30mm

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) :	30.0	51.6	138.4	102.0	67.0	42.0
durée (mm,s) :	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.05	0.11	0.78	2.13	4.10	5.50
6.67	7.86	9.12	9.94	10.41	10.79	11.18	11.38	11.43	11.45	11.46			

AVERSE 6 de 106,1 mm le 08/02/85 à 5h20mm

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) :	31.5	59.2	140.0	120.0	100.0	80.0	43.0
durée (mm,s) :	30.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.17
0.23	0.28	0.34	0.93	2.78	5.53	8.54	10.93	13.24	15.56	17.87	19.91	21.68	23.48
25.25	26.54	27.48	28.43	29.38	29.89	29.99	30.05	30.08	30.09				

PARCELLE 6

AVERSE 1 de 105.0 mm le 01/02/85 à 12h20mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.5 60.0 137.0 120.0 100.0 80.0 41.5
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
 0.01 0.02 0.03 0.05 0.20 0.59 1.18 1.63 1.90 2.12 2.33 2.45 2.49 2.54
 2.59 2.61 2.63 2.64 2.64 2.64 2.65 2.65 2.65

AVERSE 2 de 72.9 mm le 04/02/85 à 0h20mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 28.4 50.5 144.0 103.0 72.0 39.3
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.06 0.50 1.62 2.24
 2.46 2.68 2.97 3.11 3.13 3.14 3.16 3.18 3.19 3.19 3.19

AVERSE 3 de 72.6 mm le 05/02/85 à 17h30

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 31.8 50.5 140.0 104.0 67.5 41.6
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.03 0.05 0.06 0.08 0.09 0.12 0.14 0.28 0.98 2.74 5.08 6.33
 7.36 8.52 9.84 10.66 10.98 11.21 11.44 11.55 11.59 11.60 11.60

AVERSE 4 de 72.1 mm le 06/02/85 à 15h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.5 51.4 139.0 105.0 70.0 37.7
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.08 1.37 3.87 6.47 8.13
 9.72 11.37 13.18 14.31 14.97 15.58 16.22 16.54 16.64 16.67 16.68

AVERSE 5 de 69.4 mm le 07/02/85 à 13h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 31.0 50.0 134.0 98.1 66.2 37.4
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.03 0.04 0.05 0.23 1.67 3.89 6.31 8.00
 9.55 11.23 13.08 14.17 14.78 15.40 16.00 16.31 16.36 16.38 16.39

AVERSE 6 de 105.1 mm le 08/02/85 à 7h40mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 30.0 60.4 138.0 120.0 100.0 78.0 44.2
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00 0.00 0.03 0.05 0.06 0.07 0.07 0.07 0.08 0.08 0.08 0.09 0.10 0.10
 0.12 0.17 0.24 1.98 5.79 9.88 14.05 17.18 20.29 23.49 26.68 29.54 32.13 34.92
 37.50 39.37 40.83 42.23 43.66 44.40 44.58 44.69 44.79 44.80

PARCELLE 7

AVERSE 1 de 105,8 mm le 09/02/85 à 8h35mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 27.8 61.1 145.0 120.0 104.0 80.5 40.7
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.21
0.34	0.50	0.67	1.34	2.73	4.28	5.85	6.97	8.10	9.17	10.27	11.12	11.71	12.30
12.88	13.31	13.60	13.88	14.15	14.27	14.30	14.31	14.32					

AVERSE 2 de 71,2 mm le 12/02/85 à 10h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 28.8 49.5 140.0 96.4 68.5 44.3
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.11	0.22	0.34	0.48	1.06	2.12	3.49	4.98	5.86
6.48	6.91	7.42	7.70	7.84	7.96	8.06	8.11	8.13	8.14	8.15			

AVERSE 3 de 69,4 mm le 13/02/85 à 15h20mn (limnigramme perdu; lame ruisselée: 9,4 mm)

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 28.9 48.7 140.6 91.9 65.2 41.4
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

AVERSE 4 de 72,4 mm le 14/02/85 à 17h35mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 28.2 50.3 137.0 102.0 72.0 42.9
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.30 9.30 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.08	0.18	0.28	0.38	0.96	2.52	4.47	6.70	8.37
9.35	10.27	11.27	11.94	12.34	12.68	13.03	13.22	13.29	13.34	13.38			

AVERSE 5 de 70,8 mm le 15/02/85 à 11h20mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.4 58.5 136.0 95.5 74.3 38.9
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.11	0.21	0.35	0.92	2.77	5.28	7.90	9.95
11.44	12.83	14.32	15.42	16.22	16.91	17.57	17.97	18.10	18.17	18.24	18.25		

AVERSE 6 de 106,7 mm le 16/02/85 à 5h10mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 31.0 55.9 138.0 125.0 108.0 81.0 39.1
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.02	0.05	0.06	0.09	0.15	0.22	0.30	0.37	0.46	0.53	0.61	0.78
1.07	1.40	1.76	2.80	5.59	9.00	12.50	15.39	17.93	20.48	23.06	25.10	27.15	28.97
30.98	32.49	33.70	34.88	36.05	36.75	36.94	37.07	37.17	37.19				

PARCELLE 8

AVERSE 1 de 104.3 mm le 09/02/85 à 11h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.0 59.8 140.0 120.0 100.0 80.0 39.1
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.06	0.13
0.28	0.43	0.62	1.40	3.08	4.88	6.62	7.88	8.75	9.80	10.88	11.68	12.22	12.77
13.37	13.80	14.01	14.20	14.38	14.44	14.44	14.44	14.44					

AVERSE 2 de 72.0 mm le 12/02/85 à 8h20mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 28.1 52.3 140.0 100.0 71.8 40.0
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.19	0.28	0.90	2.38	4.20	6.18	7.35
8.05	8.80	9.63	10.11	10.32	10.47	10.63	10.72	10.74	10.74	10.74			

AVERSE 3 de 69.0 mm le 13/02/85 à 17h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 28.4 49.7 137.0 96.2 66.0 36.9
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.13	0.24	0.32	0.95	2.69	4.66	6.72	7.90
8.61	9.35	10.17	10.74	11.08	11.37	11.69	11.86	11.88	11.89	11.89			

AVERSE 4 de 70.8 mm le 14/02/85 à 15h20mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 29.2 49.2 138.0 96.6 73.5 38.3
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.21	0.34	0.47	1.24	3.28	5.50	7.88	9.29
10.17	11.09	12.03	12.78	13.23	13.64	14.07	14.31	14.34	14.38	14.39	14.40		

AVERSE 5 de 71.1 mm le 15/02/85 à 13h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 28.4 52.1 139.3 102.5 66.0 38.6
 durée (mn,s) : 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.19	0.36	1.35	3.79	6.38	9.25	11.04
12.40	13.88	15.50	16.63	17.13	17.47	17.80	18.00	18.06	18.08	18.09			

AVERSE 6 de 104.0 mm le 16/02/85 à 7h30mn

HYETOGRAMME :

intensité (mm/H) : 31.9 56.5 144.0 114.0 97.1 76.5 40.0
 durée (mn,s) : 30.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00

LAME RUISSELEE (pas de temps: 150 secondes) :

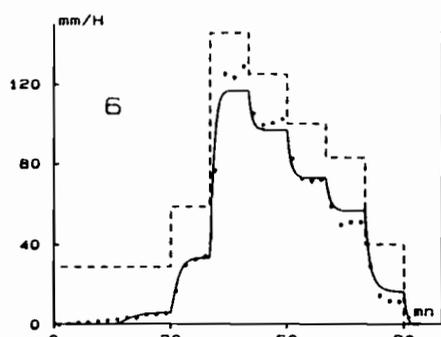
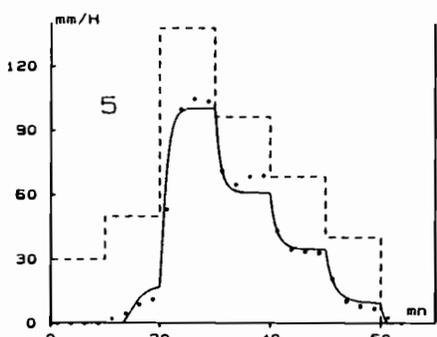
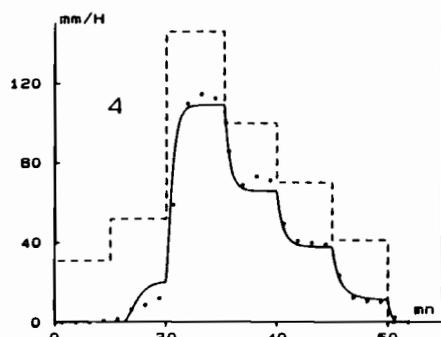
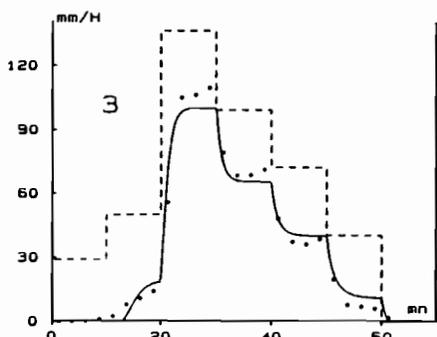
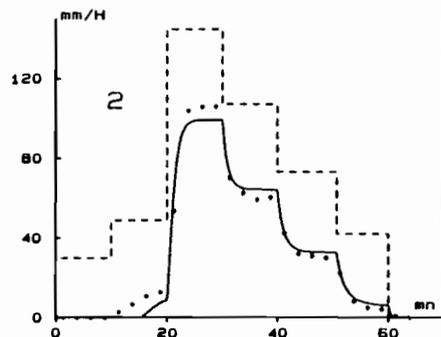
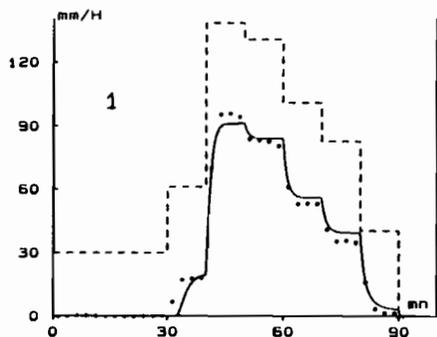
0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.10	0.15	0.21	0.28	0.32	0.39	0.44	0.73
1.34	2.12	2.91	5.00	8.60	12.20	15.87	19.01	21.88	24.80	27.70	30.17	32.25	34.38
36.43	38.13	39.45	40.78	42.02	42.85	43.09	43.21	43.32	43.36				

A N N E X E 2

Limnigrammes du ruissellement recueilli à l'aval des parcelles de 1 m x 1 m du bassin de la Daye. Comparaison des résultats de la modélisation avec les valeurs mesurées.

- Les points représentent les valeurs mesurées sur le terrain
- Les traits pleins figurent le résultat de la modélisation
- Les limnigrammes de ruissellement sont tracés successivement :
 - en débit divisé par la surface des parcelles, soit une intensité de ruissellement (mm.H^{-1})
 - en volume ruisselé cumulé divisé par la surface des parcelles, soit une lame ruisselée (mm)
- Les tirets figurent l'intensité des hyétogrammes d'averse (mm/H)
- Sur chaque graphe est indiqué le numéro d'ordre d'averse correspondant.
- Pas de temps utilisé dans la discrétisation du modèle : 5 secondes.

PARCELLE 1

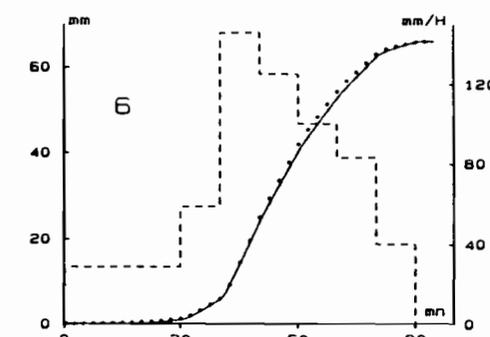
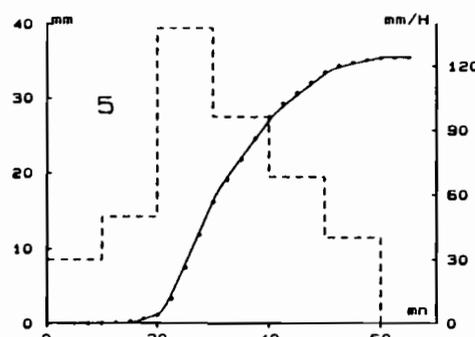
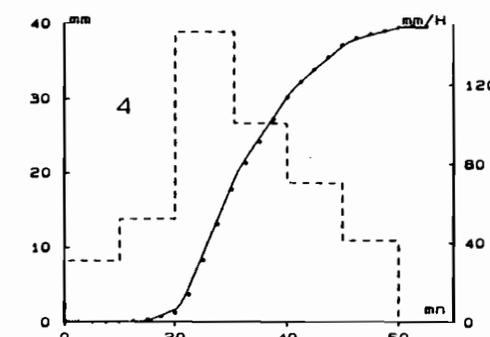
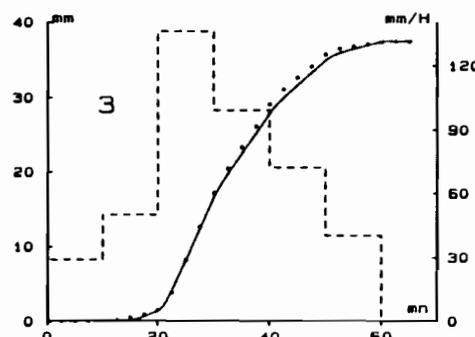
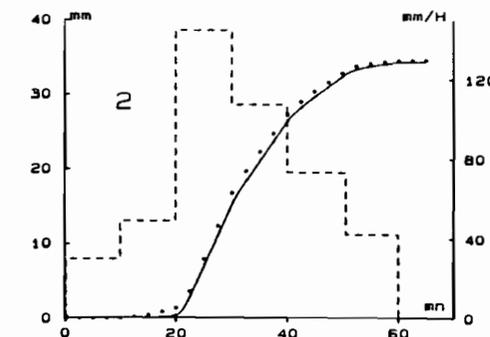
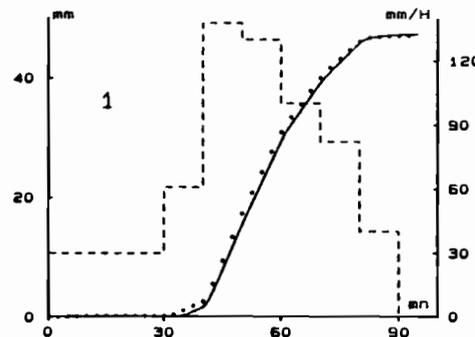


..... — : intensité ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 3.56 HL = 3.390 mm

valeurs de S (mm²) : 38.32 36.46 28.74 29.05 30.28 22.87
 averse : 1 2 3 4 5 6

PARCELLE 1

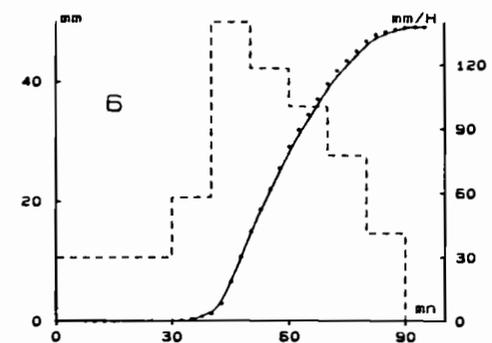
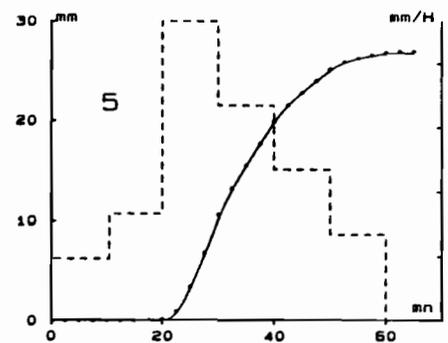
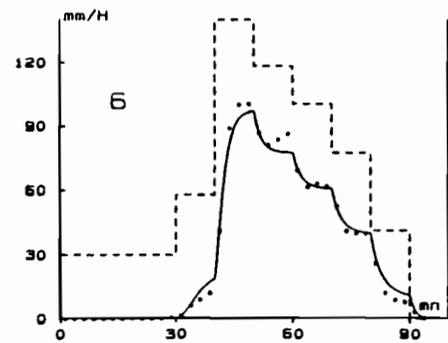
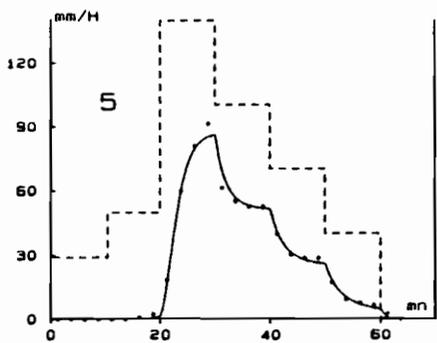
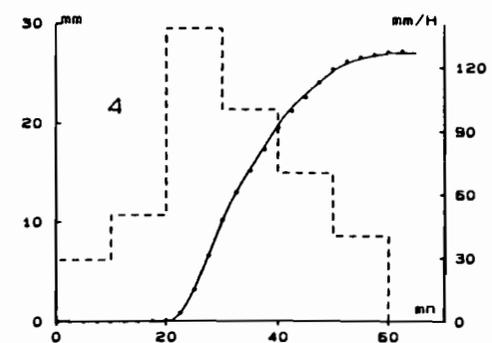
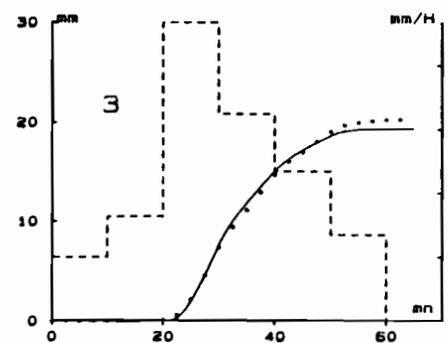
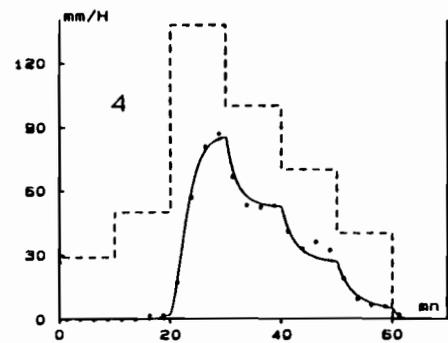
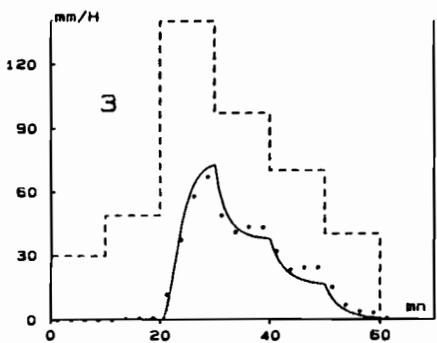
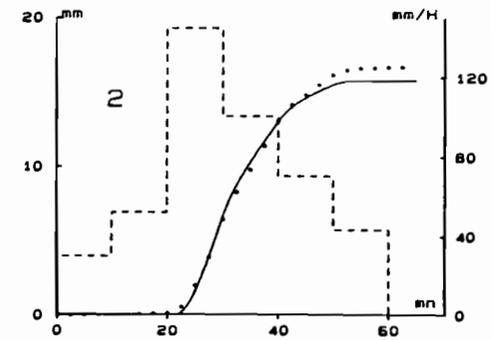
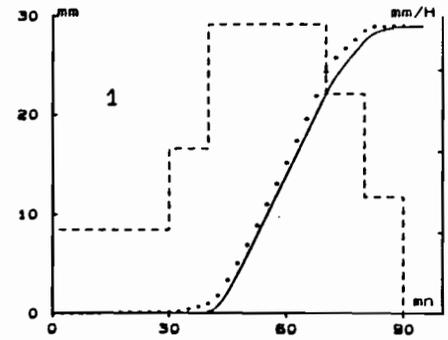
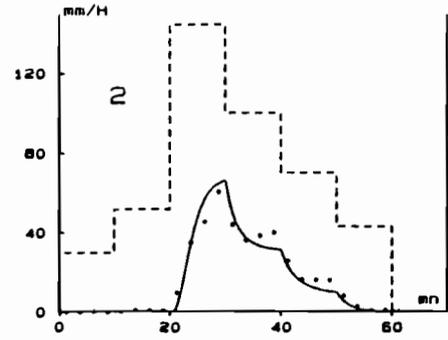
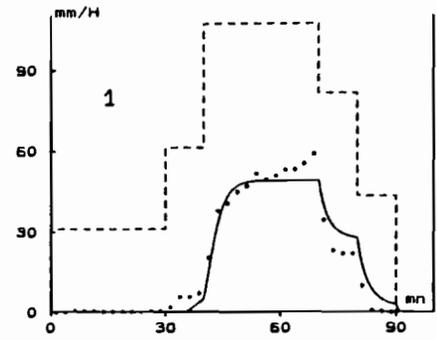


..... — : lame ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 3.56 HL = 3.390 mm

valeurs de S (mm²) : 38.32 36.46 28.74 29.05 30.28 22.87
 averse : 1 2 3 4 5 6

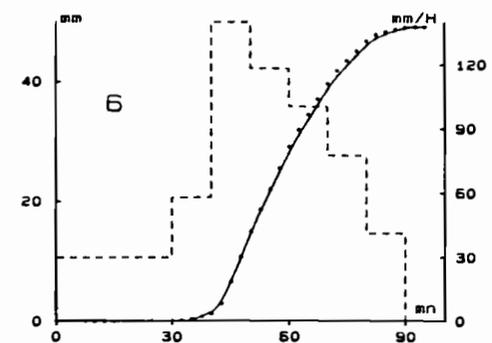
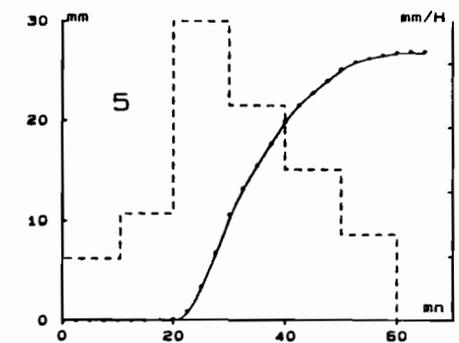
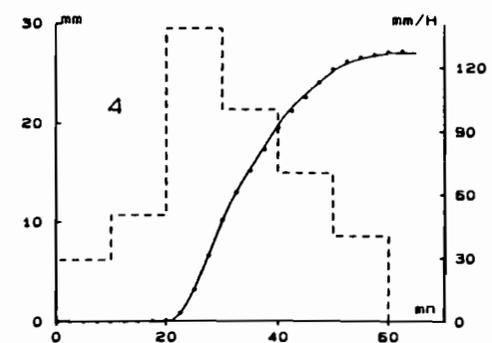
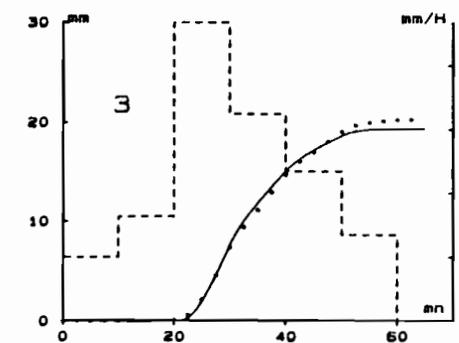
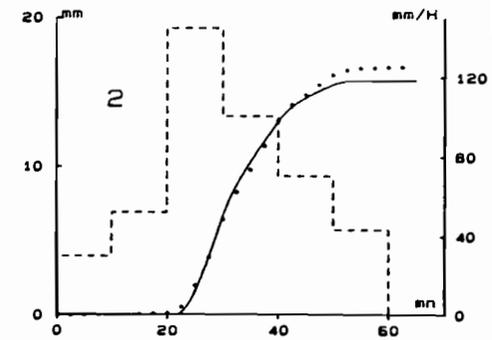
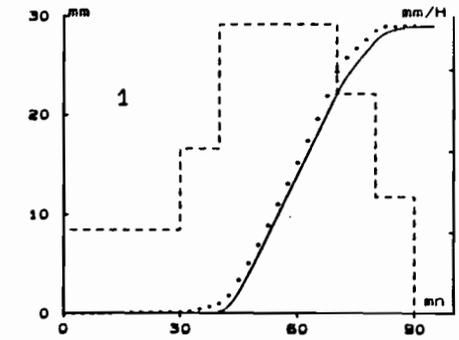
PARCELLE 2



..... ——— : intensité ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 4.15 HL = 4.030 mm
 valeurs de S (mm2) : 39.48 50.01 42.11 32.34 33.09 26.32
 averse : 1 2 3 4 5 6

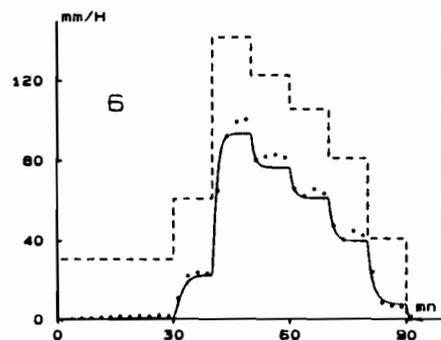
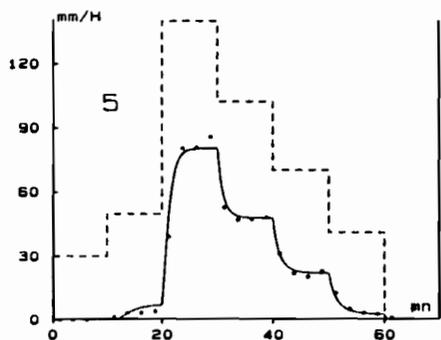
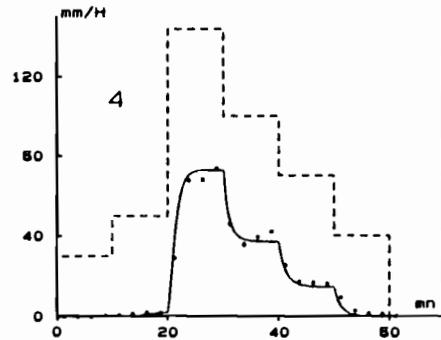
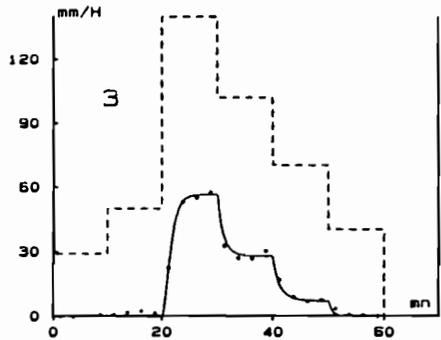
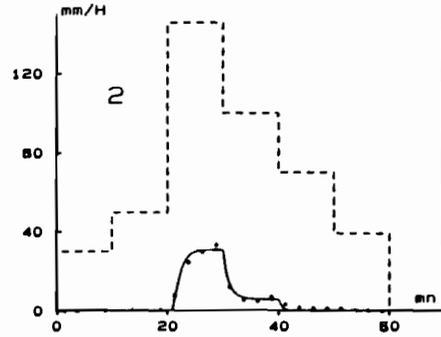
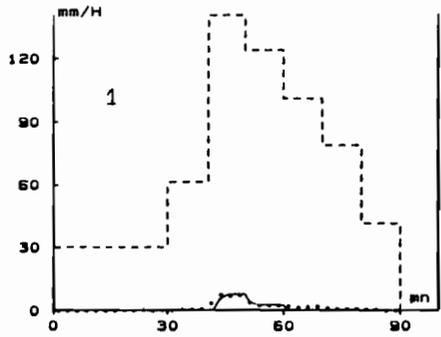
PARCELLE 2



..... ——— : lame ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 4.15 HL = 4.030 mm
 valeurs de S (mm2) : 39.48 50.01 42.11 32.34 33.09 26.32
 averse : 1 2 3 4 5 6

PARCELLE 3

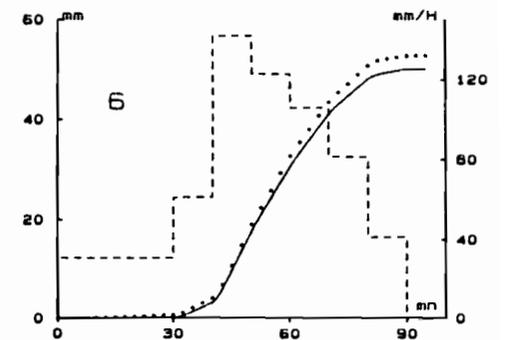
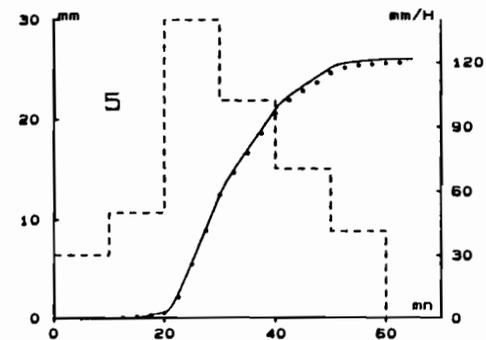
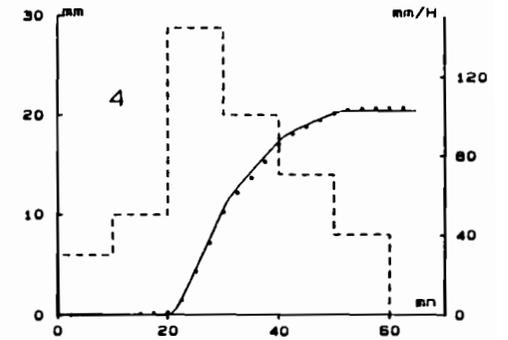
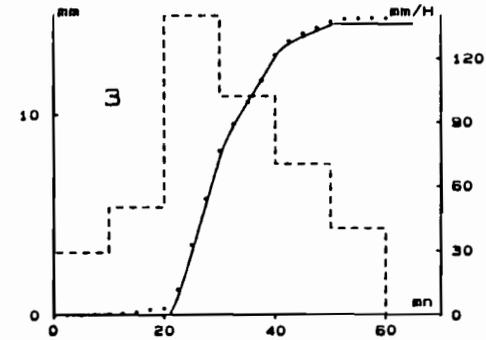
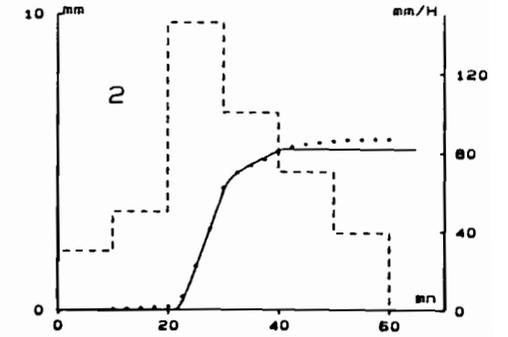
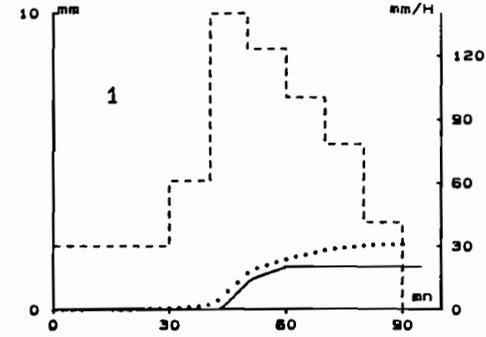


..... ——— : intensité ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 3.60 HL = 1.350 mm

valeurs de S (mm2) : 181.47 134.13 88.37 71.80 59.17 46.55
 averse : 1 2 3 4 5 6

PARCELLE 3

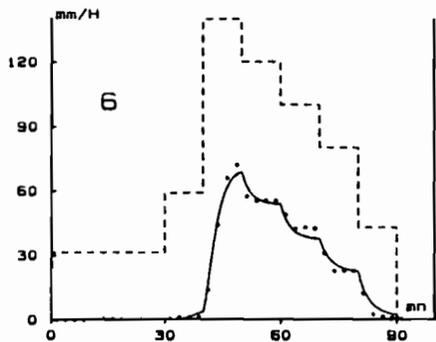
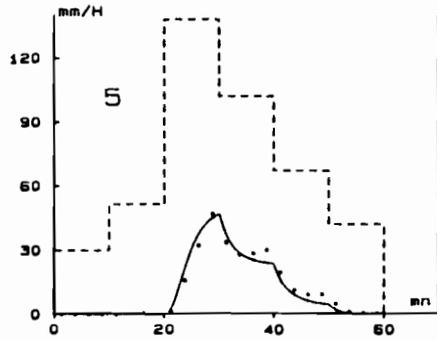
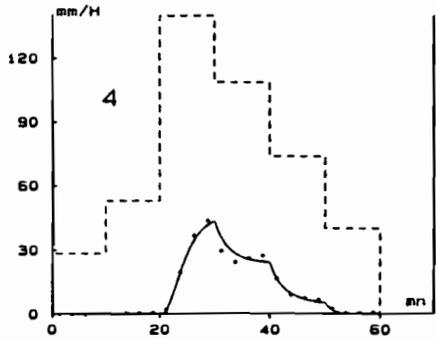
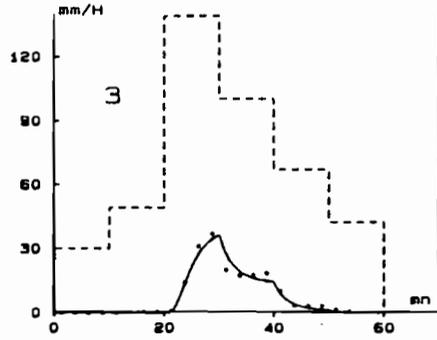
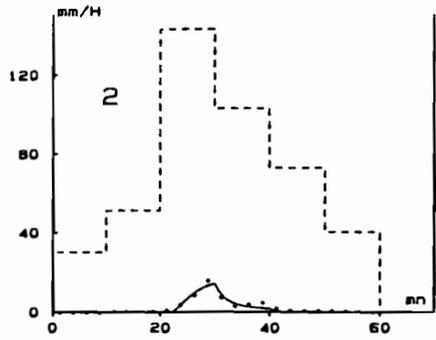


..... ——— : lame ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

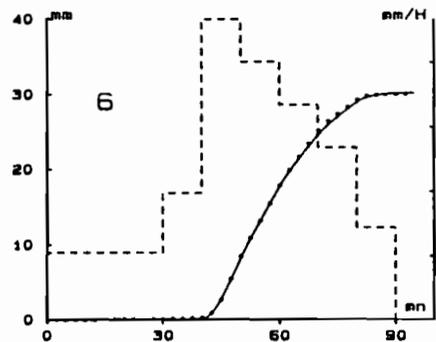
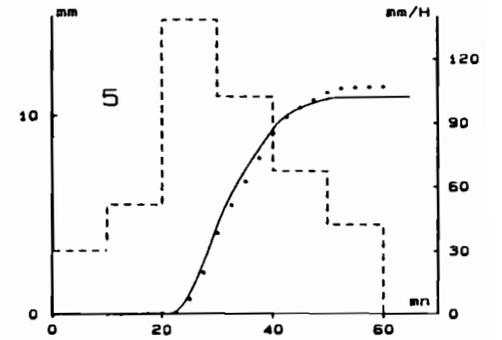
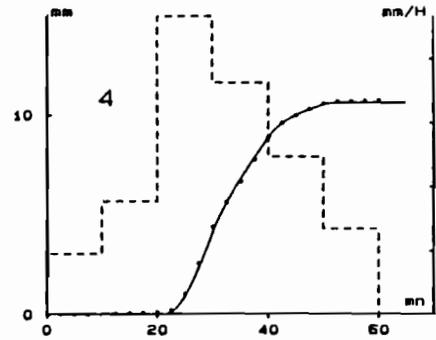
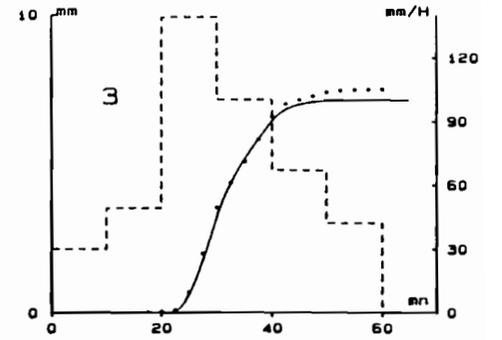
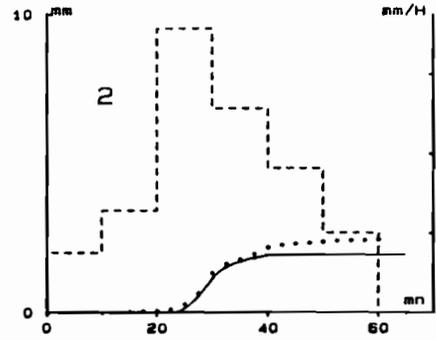
N = 3.60 HL = 1.350 mm

valeurs de S (mm2) : 181.47 134.13 88.37 71.80 59.17 46.55
 averse : 1 2 3 4 5 6

PARCELLE 5



PARCELLE 5



..... ——— : intensité ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 4.29 HL = 2.770 mm

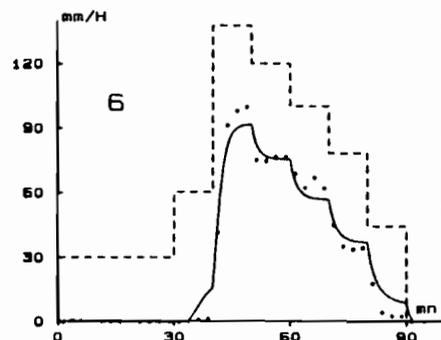
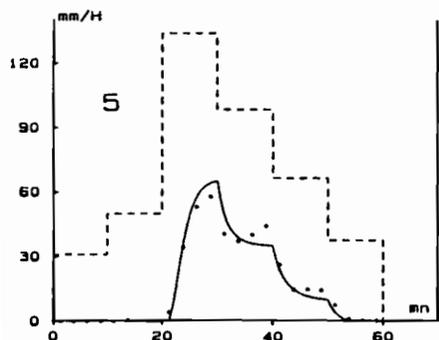
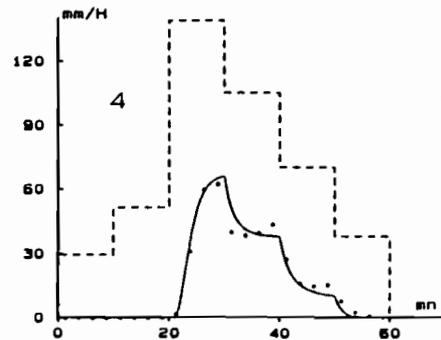
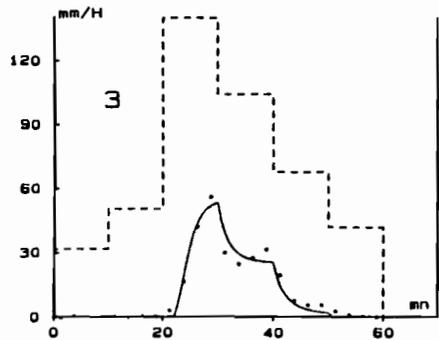
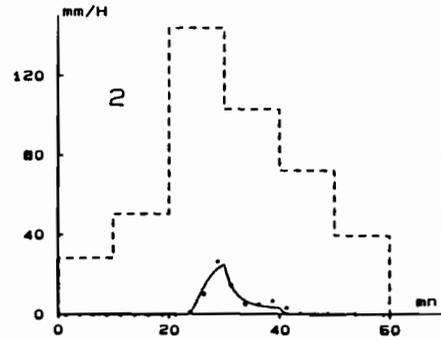
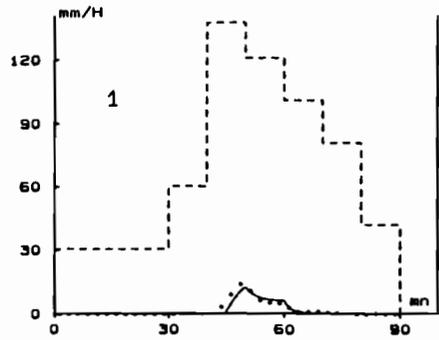
valeurs de S (mm²) : 101.97 71.66 65.45 61.32 45.47
 averse : 2 3 4 5 6

..... ——— : lame ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 4.29 HL = 2.770 mm

valeurs de S (mm²) : 101.97 71.66 65.45 61.32 45.47
 averse : 2 3 4 5 6

PARCELLE 6

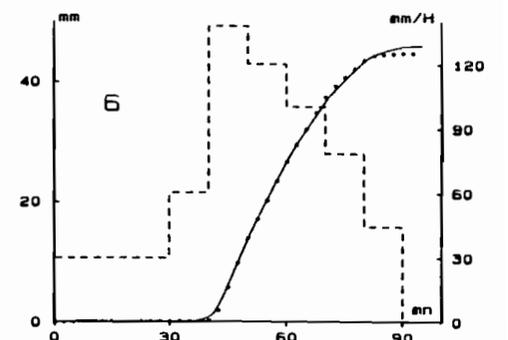
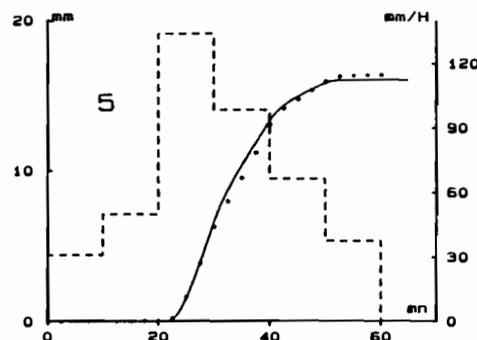
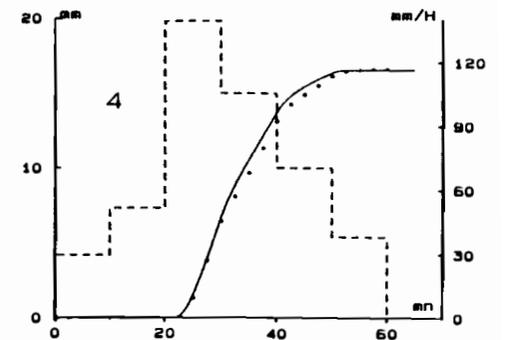
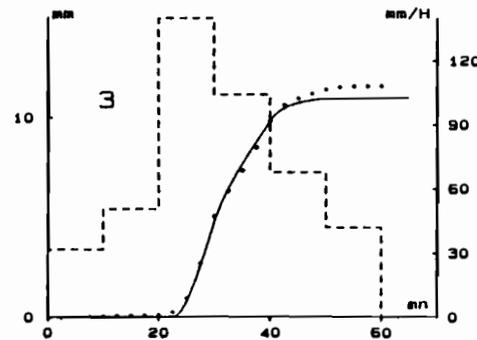
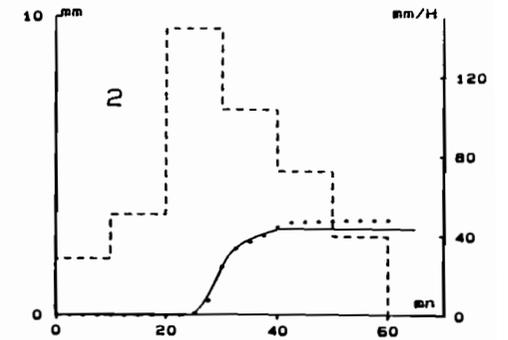
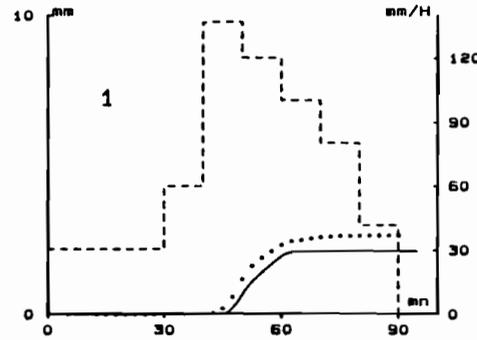


..... ——— : intensité ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 3.96 HL = 4.980 mm

valeurs de S (mm2) : 91.00 83.20 57.20 47.32 44.72 29.12
 averse : 1 2 3 4 5 6

PARCELLE 6

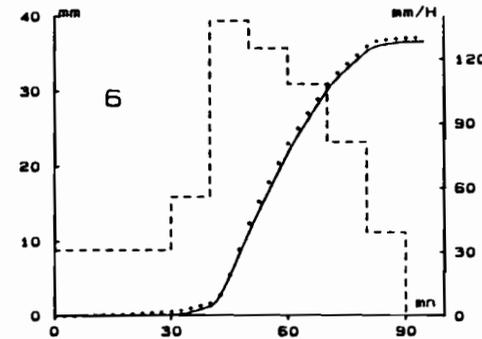
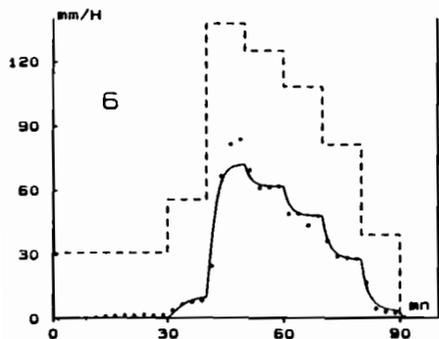
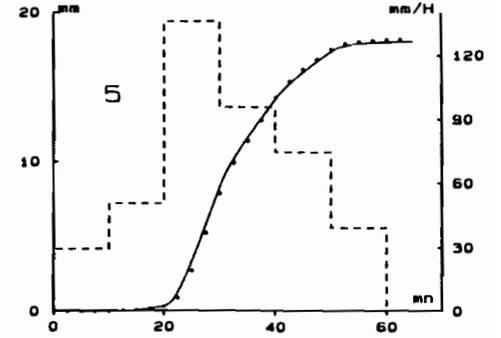
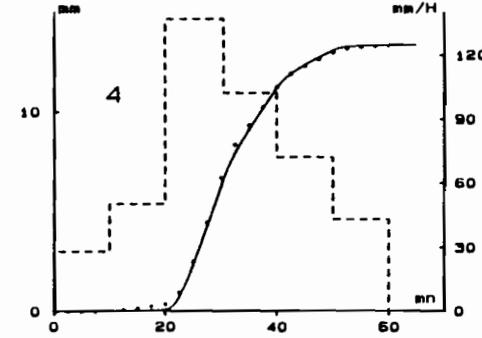
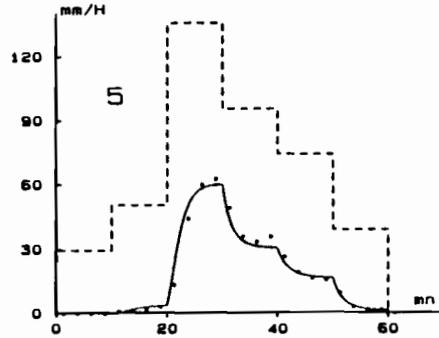
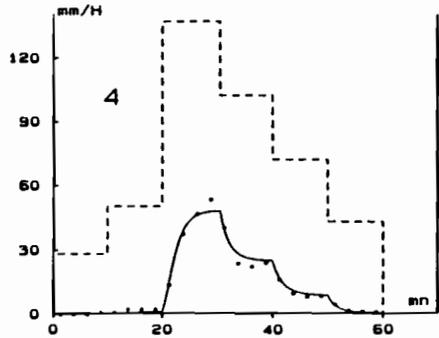
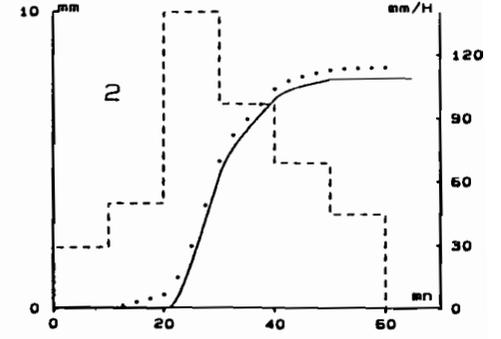
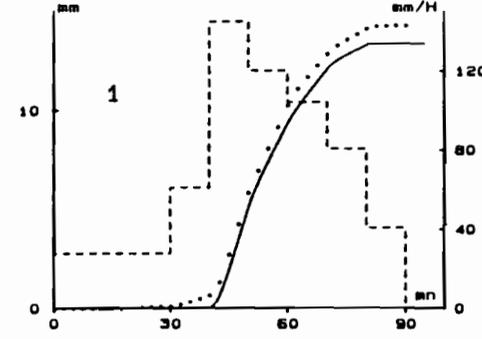
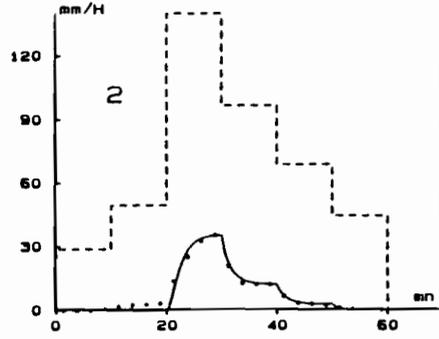
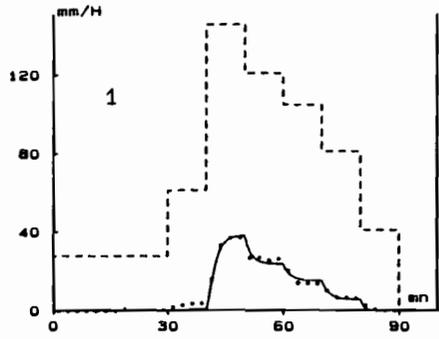


..... ——— : lame ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 3.96 HL = 4.980 mm

valeurs de S (mm2) : 91.00 83.20 57.20 47.32 44.72 29.12
 averse : 1 2 3 4 5 6

PARCELLE 7

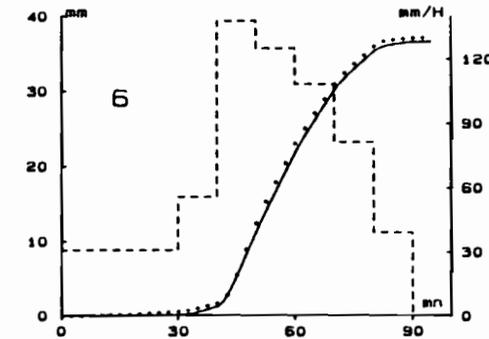
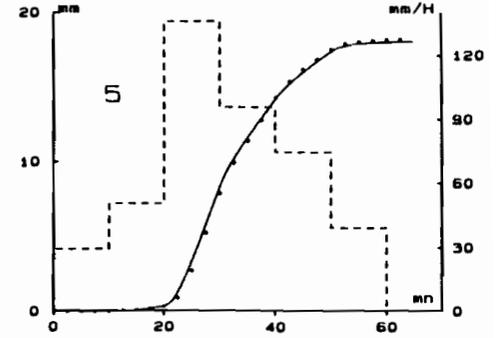
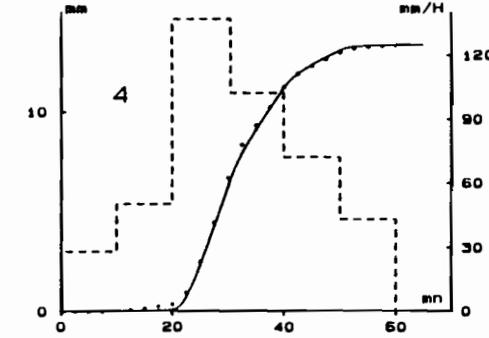
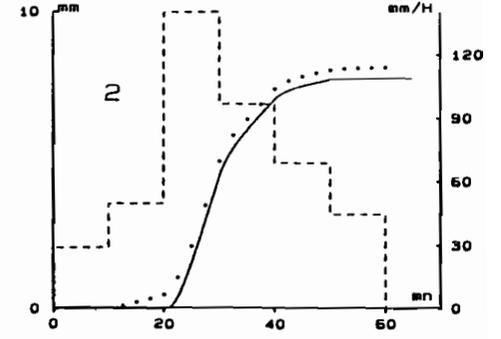
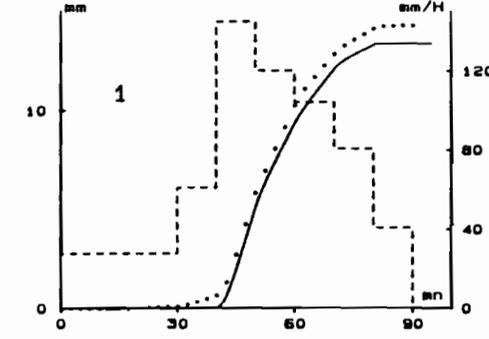


..... ——— : intensité ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 4.00 HL = 0.742 mm

valeurs de S (mm²) : 105.46 104.63 83.70 67.80 56.92
 averse : 1 2 4 5 6

PARCELLE 7

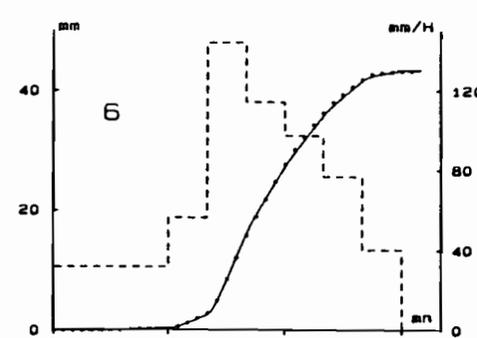
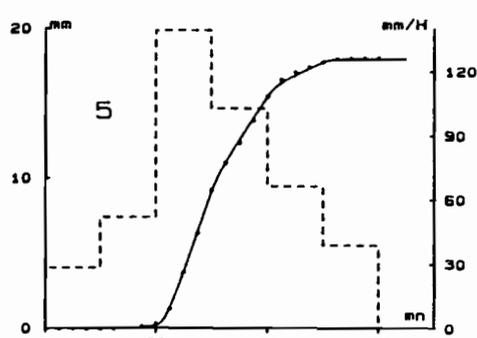
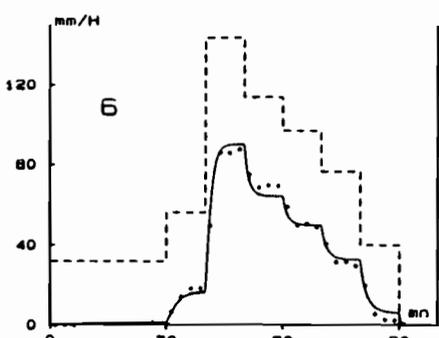
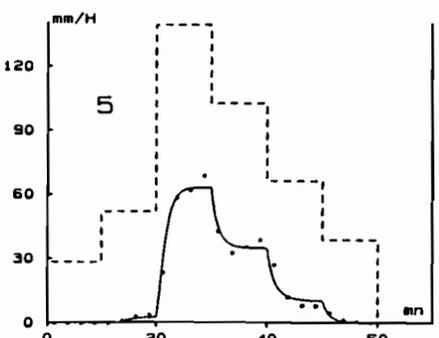
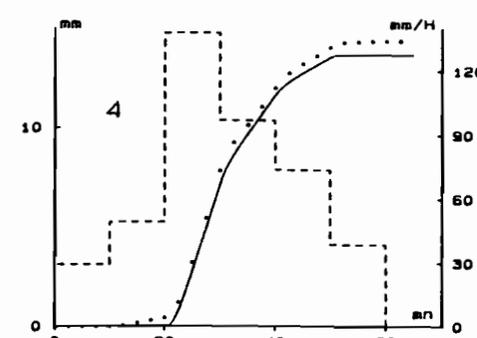
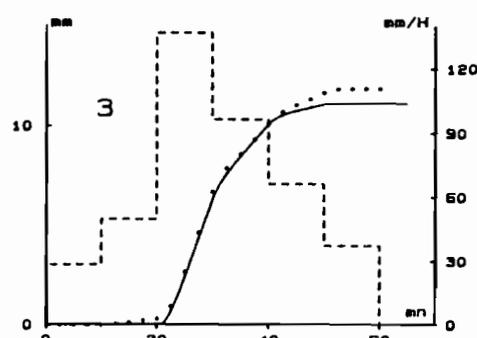
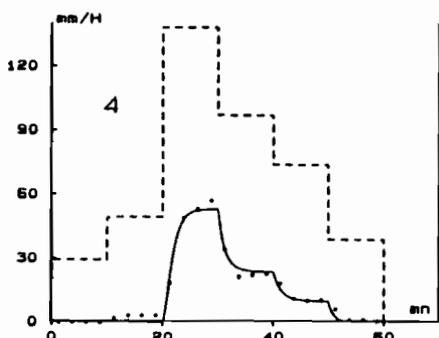
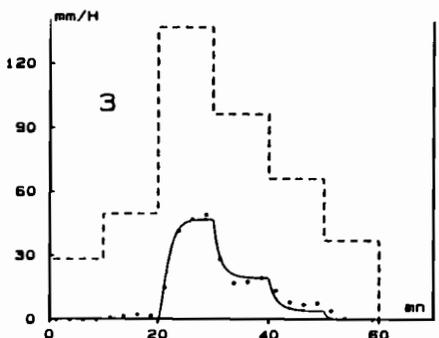
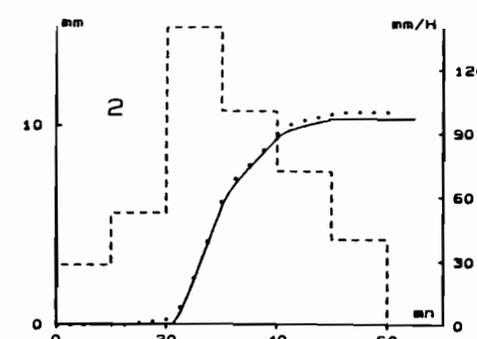
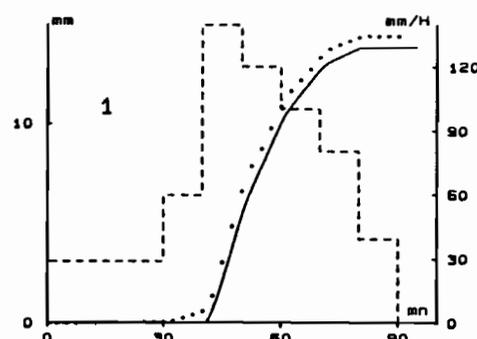
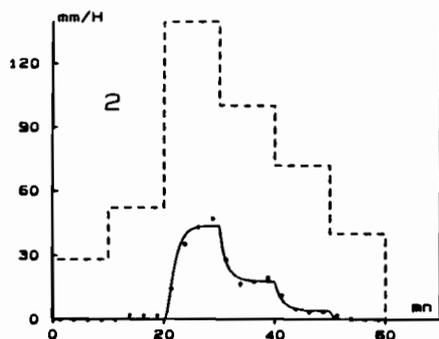
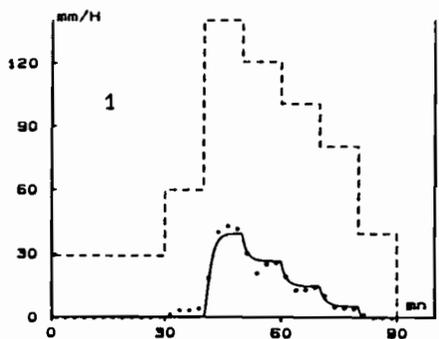


..... ——— : lame ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 4.00 HL = 0.742 mm

valeurs de S (mm²) : 105.46 104.63 83.70 67.80 56.92
 averse : 1 2 4 5 6

PARCELLE 8

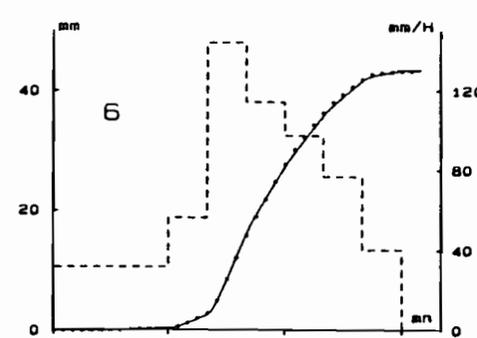
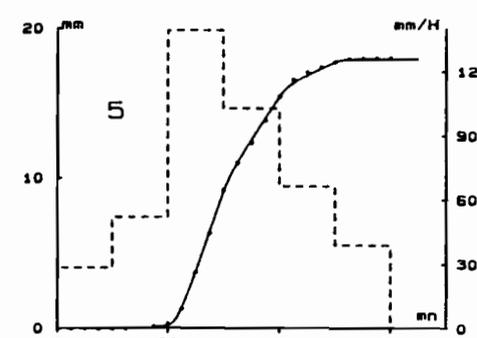
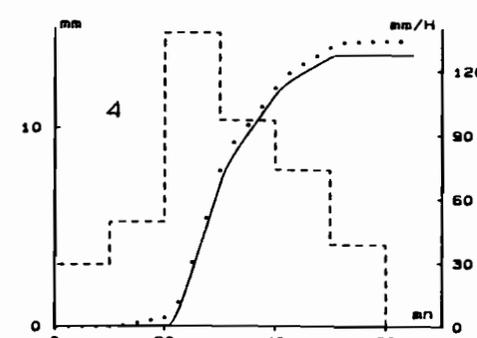
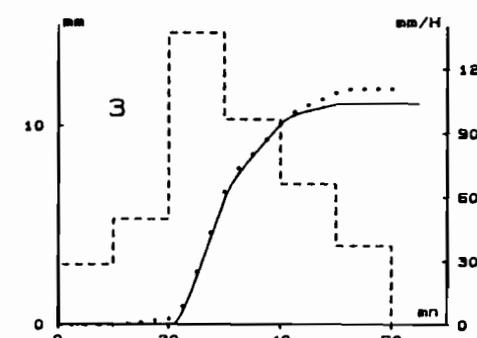
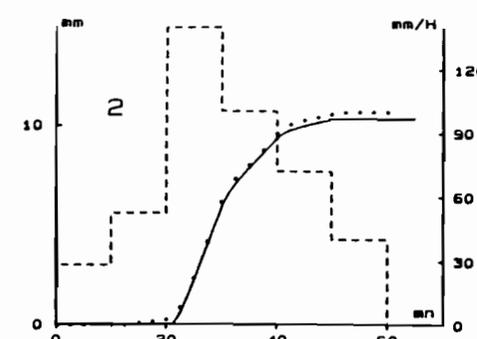
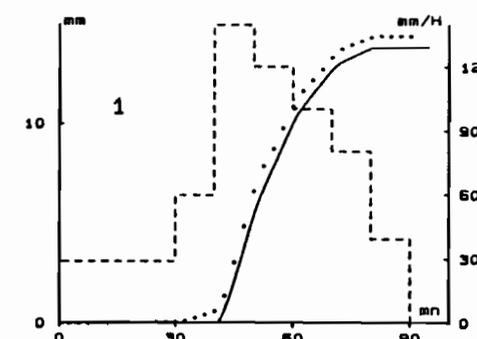


..... : intensité ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 3.73 HL = 1.060 mm

valeurs de S (mm²) : 110.50 103.49 95.59 88.58 76.30 49.99
 averse : 1 2 3 4 5 6

PARCELLE 8



..... : lame ruisselée mesurée et modélisée
 - - - - - : hyétogramme d'averse

N = 3.73 HL = 1.060 mm

valeurs de S (mm²) : 110.50 103.49 95.59 88.58 76.30 49.99
 averse : 1 2 3 4 5 6

A N N E X E 3

Extrapolation du modèle. Linnigrammes du ruissellement obtenu à l'aval de parcelles de 1 mètre de large et de longueur variable

- Pour chaque parcelle représentative, les linnigrammes reconstitués pour différentes longueurs de parcelle fictive sont relatifs au hyétogramme de la quatrième averse simulée, et à une valeur de paramètre S correspondant à cette quatrième averse.

- Les linnigrammes de ruissellement sont représentés successivement :

-en débit ($m^2.mm.H^{-1}$)

-en débit divisé par la surface des parcelles, soit une intensité de ruissellement ($mm.H^{-1}$)

- Sur le tracé en $m^2.mm.H^{-1}$ est figuré en pointillés, le linnigramme obtenu en modélisant le fonctionnement d'une parcelle de 1 m x 1 m sur laquelle le débit ruisselé à l'aval serait réinjecté à l'amont.

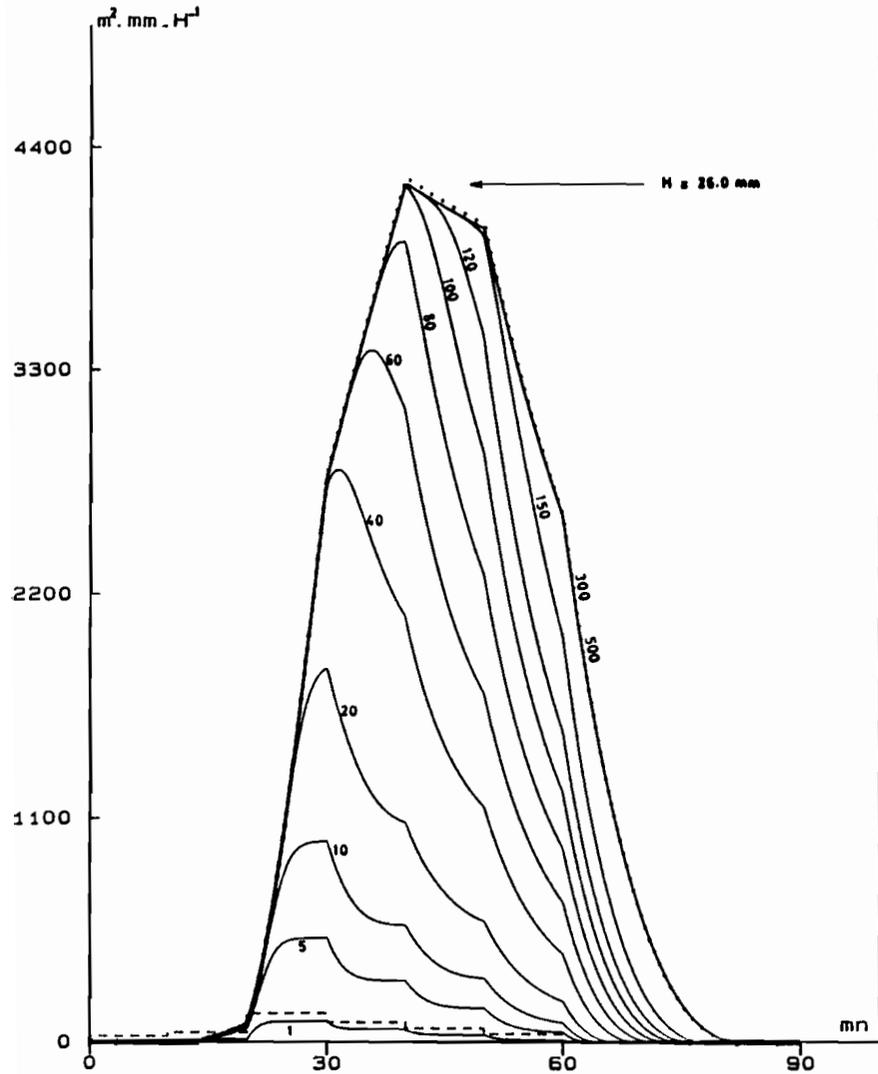
- Les tirets figurent l'intensité des hyétogrammes d'averse

- Près de chaque linnigramme est indiquée la longueur de parcelle fictive

- Pas de temps utilisé dans la discrétisation du modèle : 0,1 seconde.

PARCELLE 1 averse 4

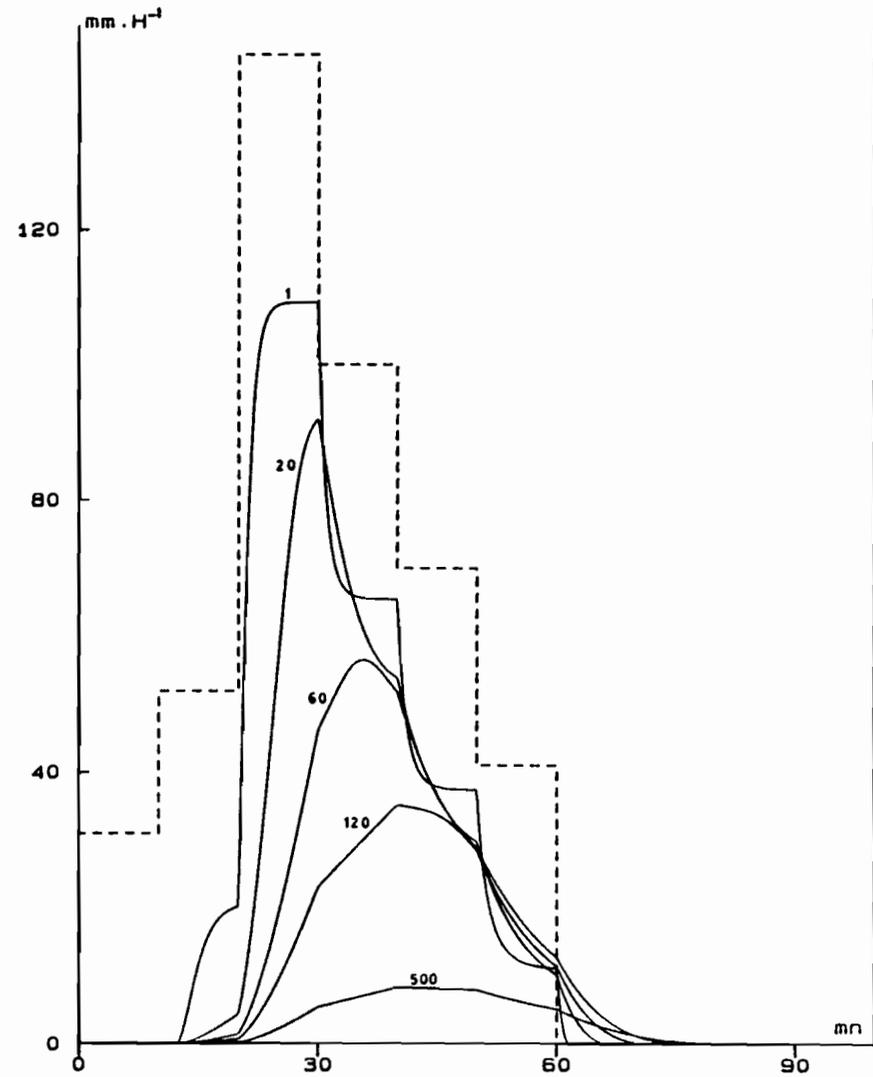
Débit ruisselé



La longueur des parcelles est notée près des courbes
 ---- : hyétogramme d'averse
 : courbe obtenue en recyclant le ruissellement

PARCELLE 1 averse 4

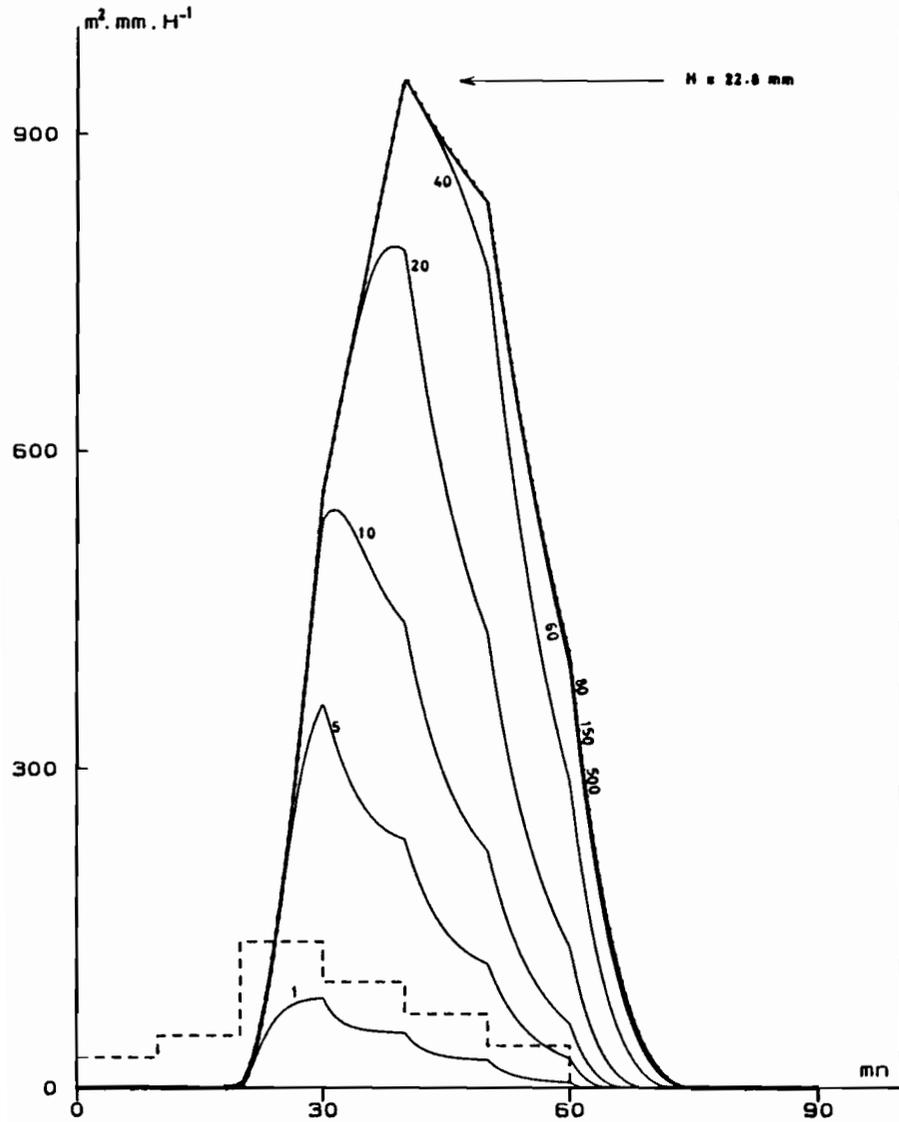
Débit ruisselé divisé par la surface des parcelles



La longueur des parcelles est notée près des courbes
 ---- : hyétogramme d'averse

PARCELLE 2 averse 4

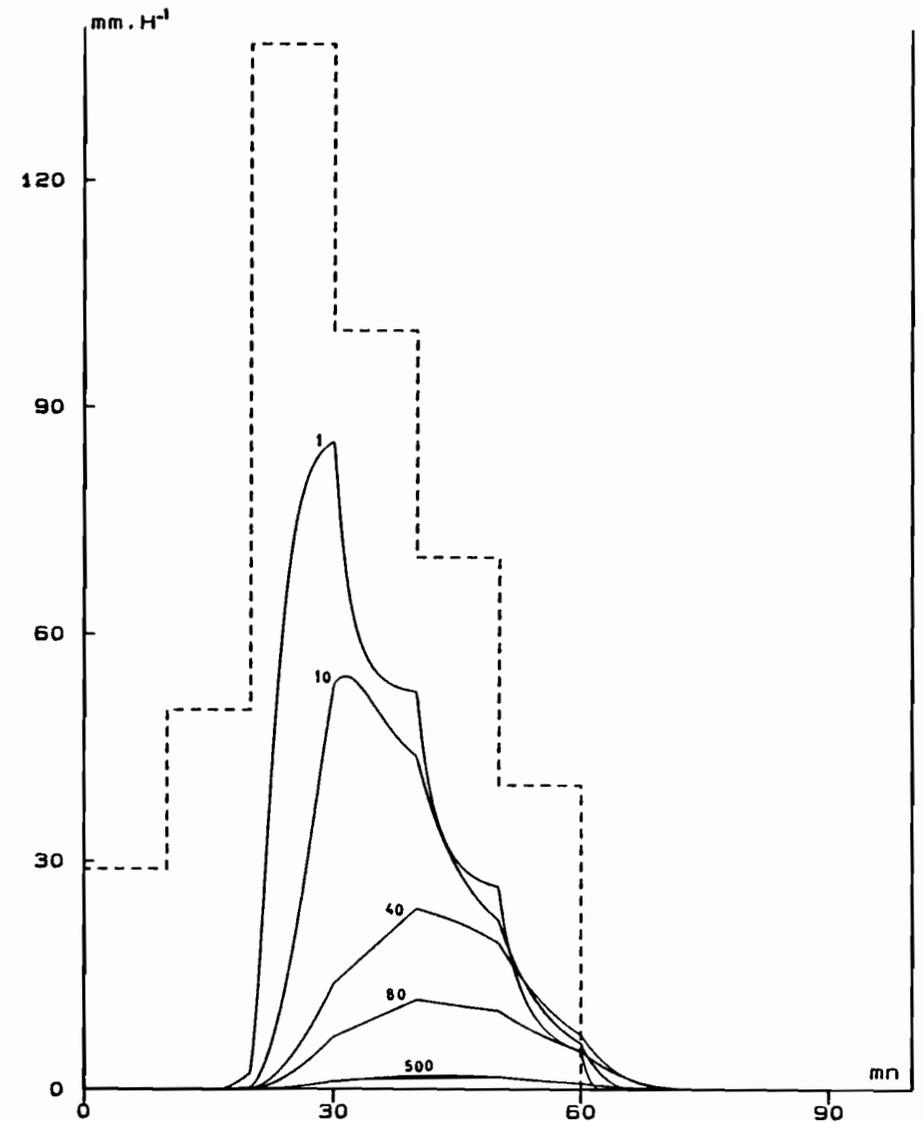
Débit ruisselé



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ---- : hyétogramme d'averse.
 : courbe obtenue en recyclant le ruissellement

PARCELLE 2 averse 4

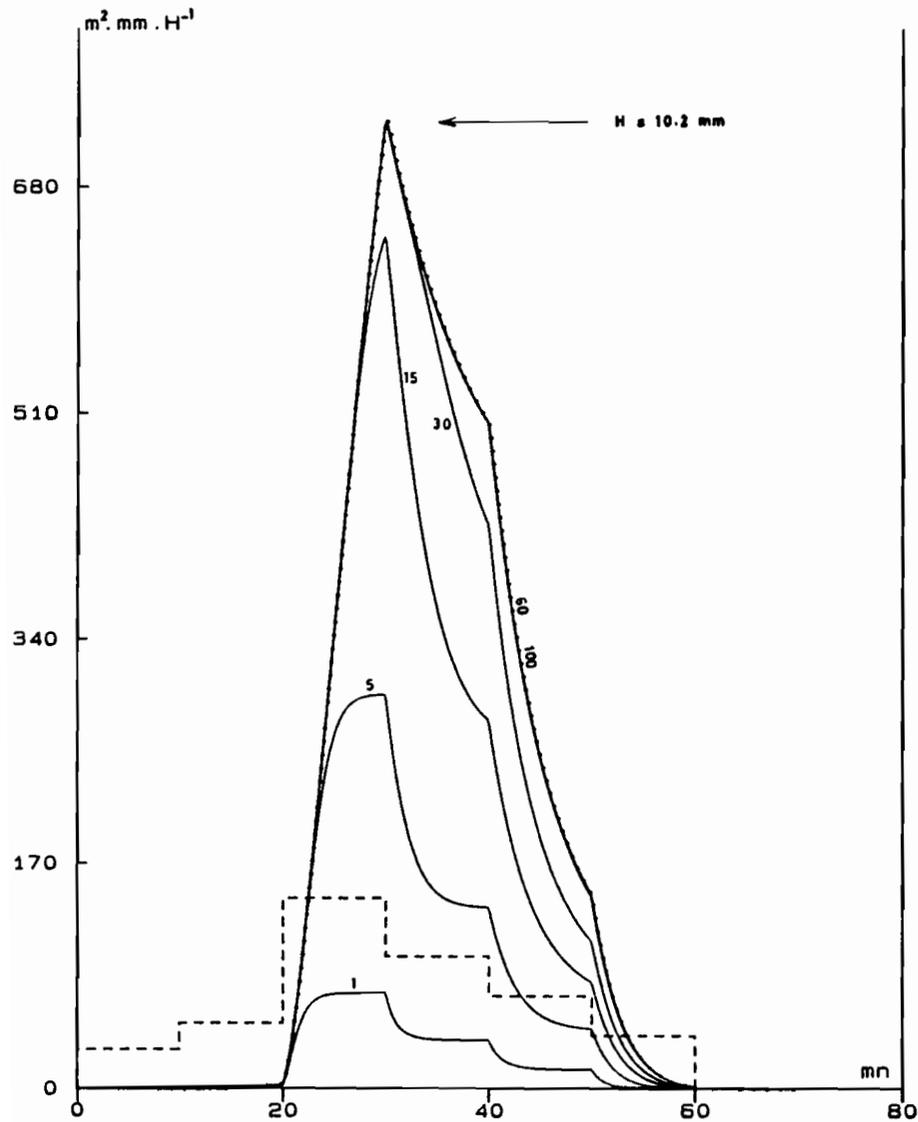
Débit ruisselé divisé par la surface des parcelles



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ---- : hyétogramme d'averse.

PARCELLE 3 averse 4

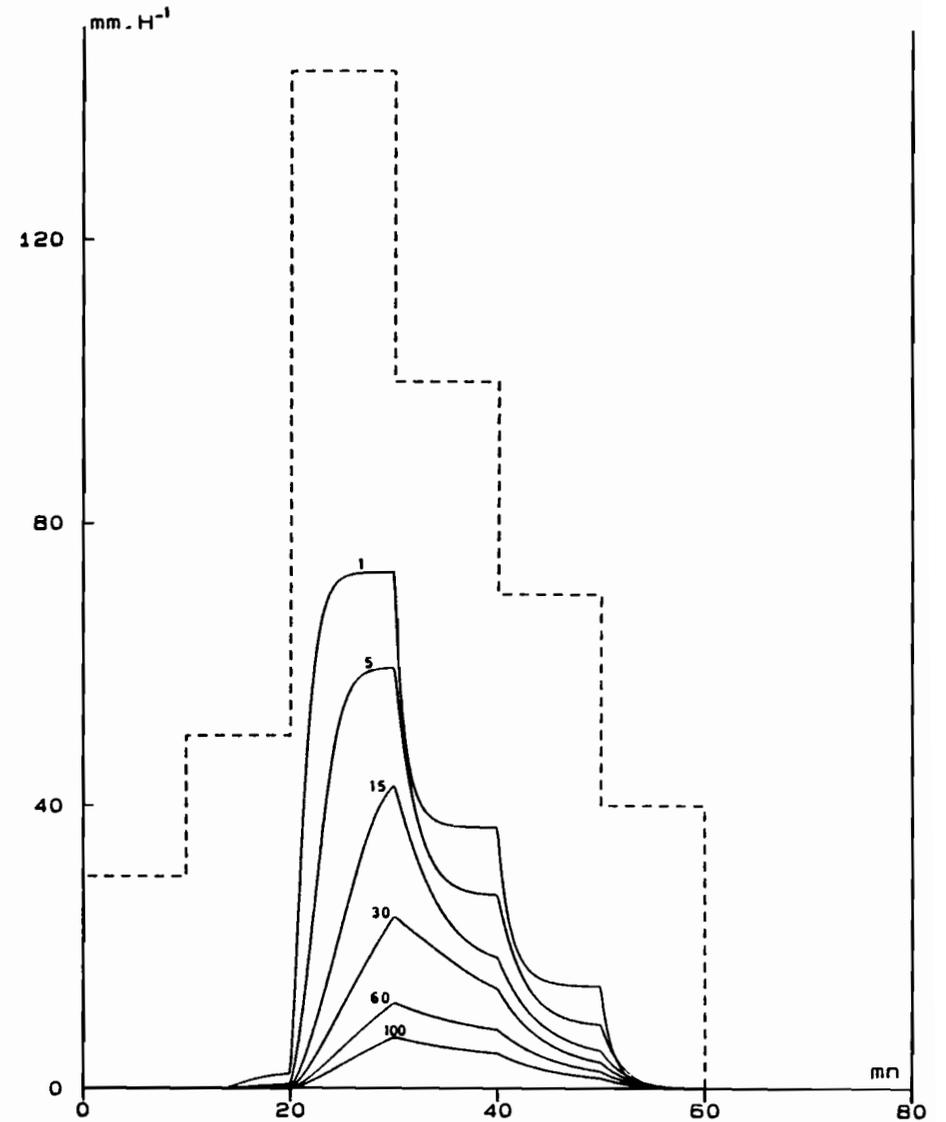
Débit ruisselé



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ---- : hyétogramme d'averse.
 : courbe obtenue en recyclant le ruissellement

PARCELLE 3 averse 4

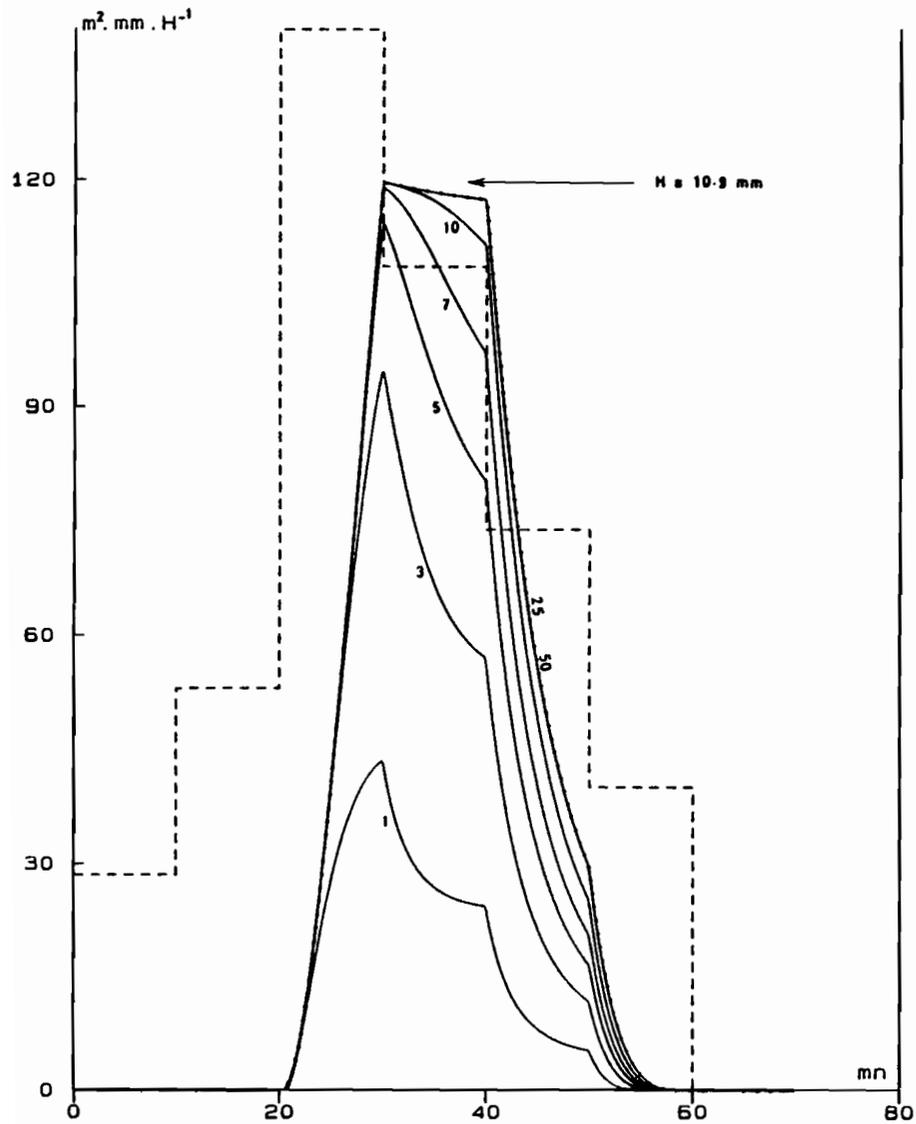
Débit ruisselé divisé par la surface des parcelles



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ---- : hyétogramme d'averse.

PARCELLE 5 averse 4

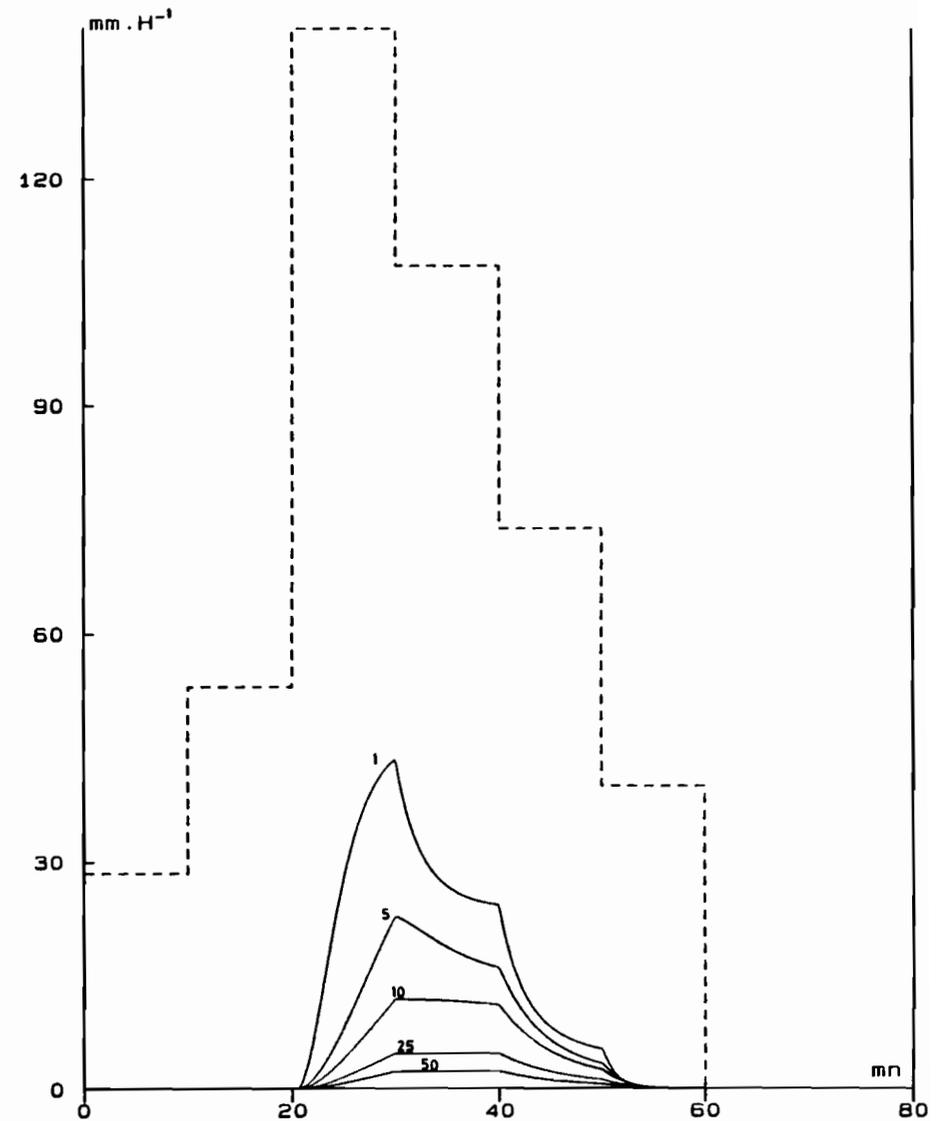
Débit ruisselé



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ----: hyétogramme d'averse.
: courbe obtenue en recyclant le ruissellement

PARCELLE 5 averse 4

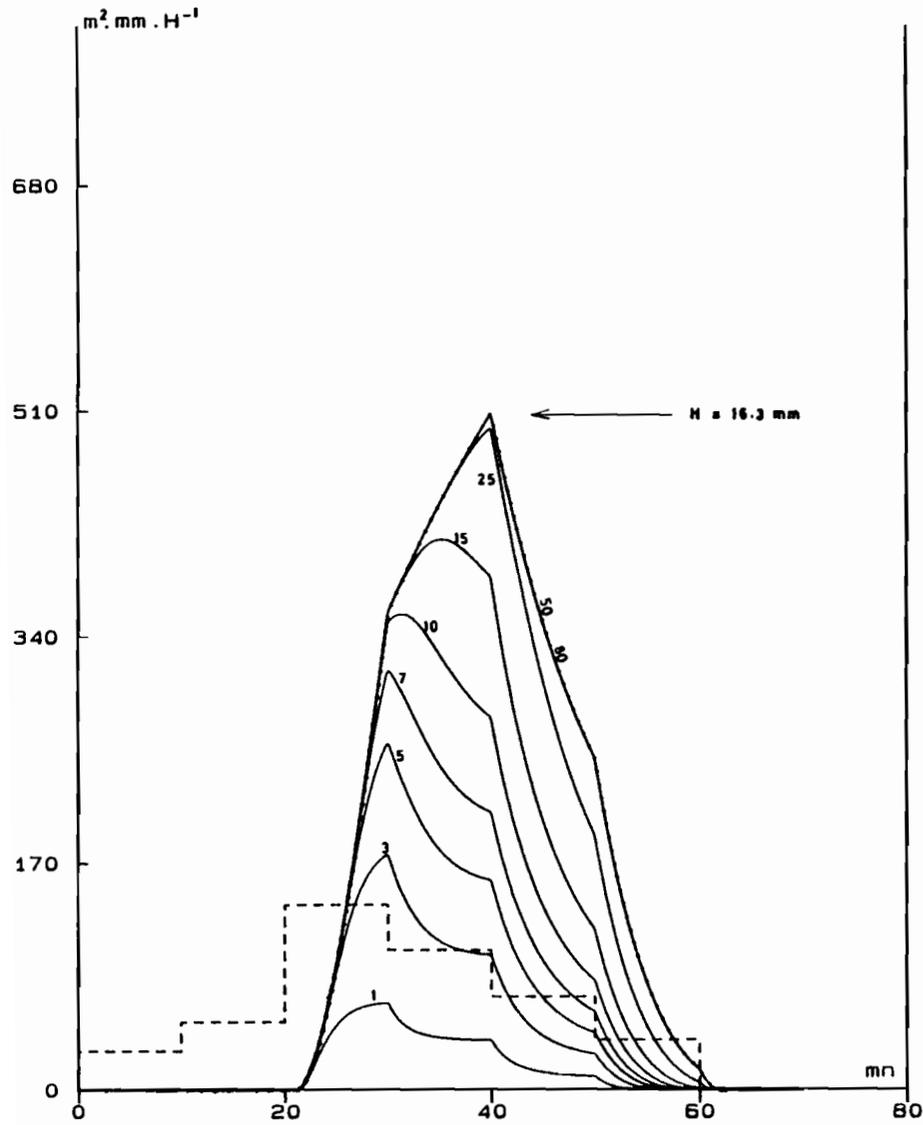
Débit ruisselé divisé par la surface des parcelles



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ----: hyétogramme d'averse.

PARCELLE 6 averse 4

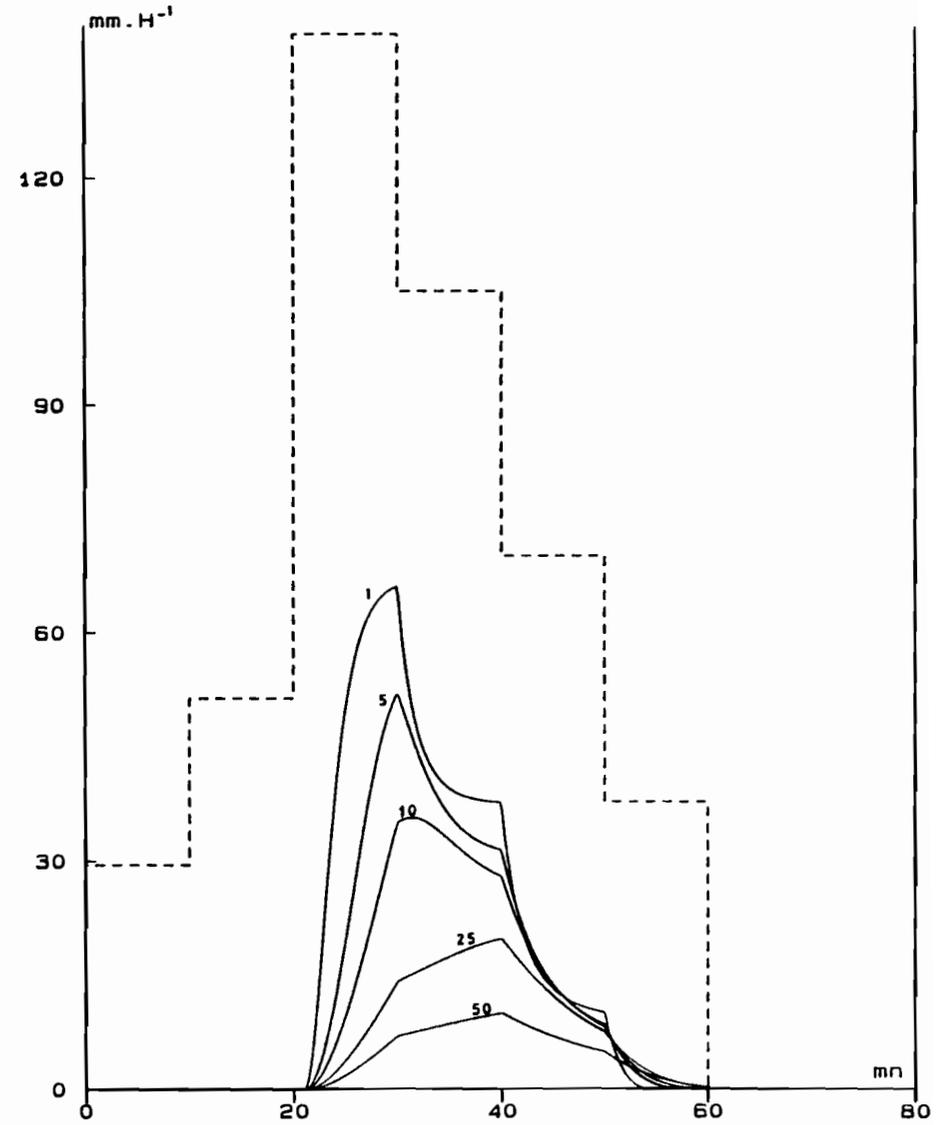
Débit ruisselé



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ----: hyétogramme d'averse.
: courbe obtenue en recyclant le ruissellement

PARCELLE 6 averse 4

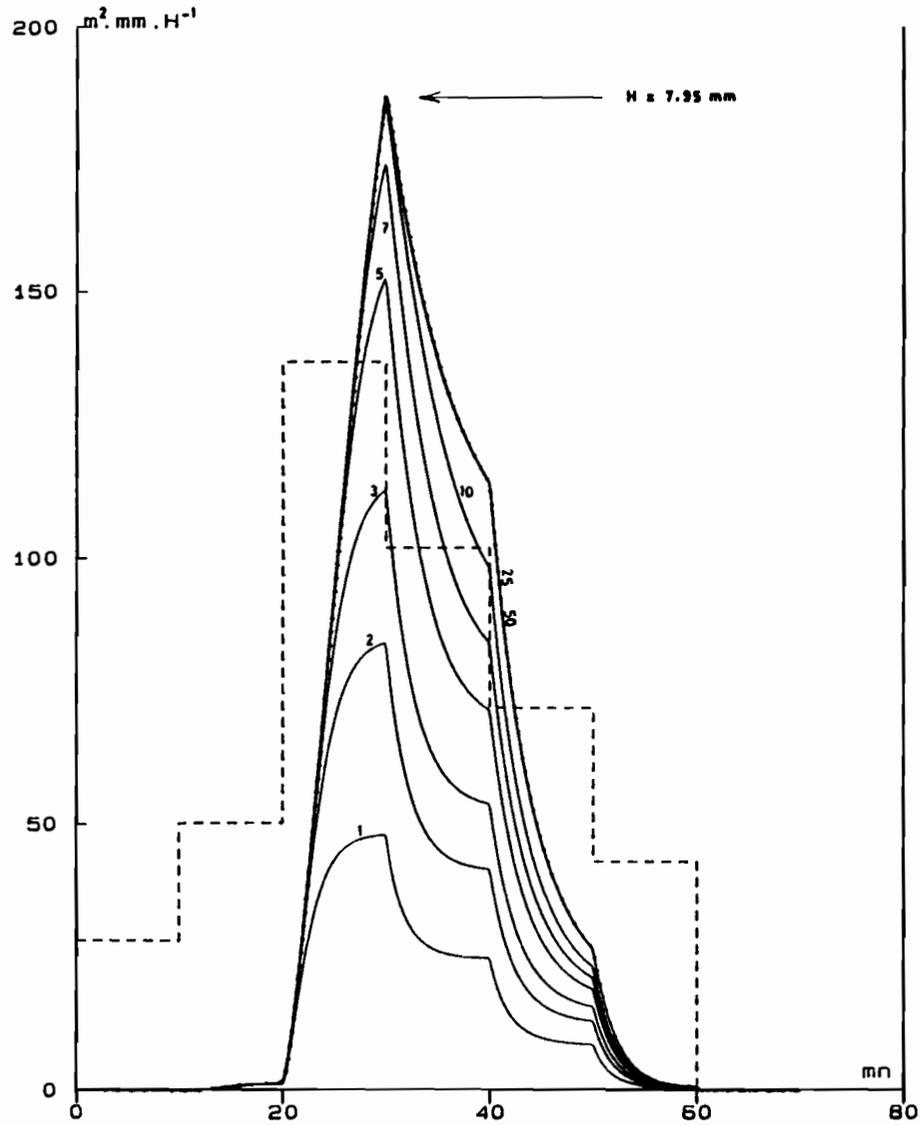
Débit ruisselé divisé par la surface des parcelles



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ----: hyétogramme d'averse.

PARCELLE 7 averse 4

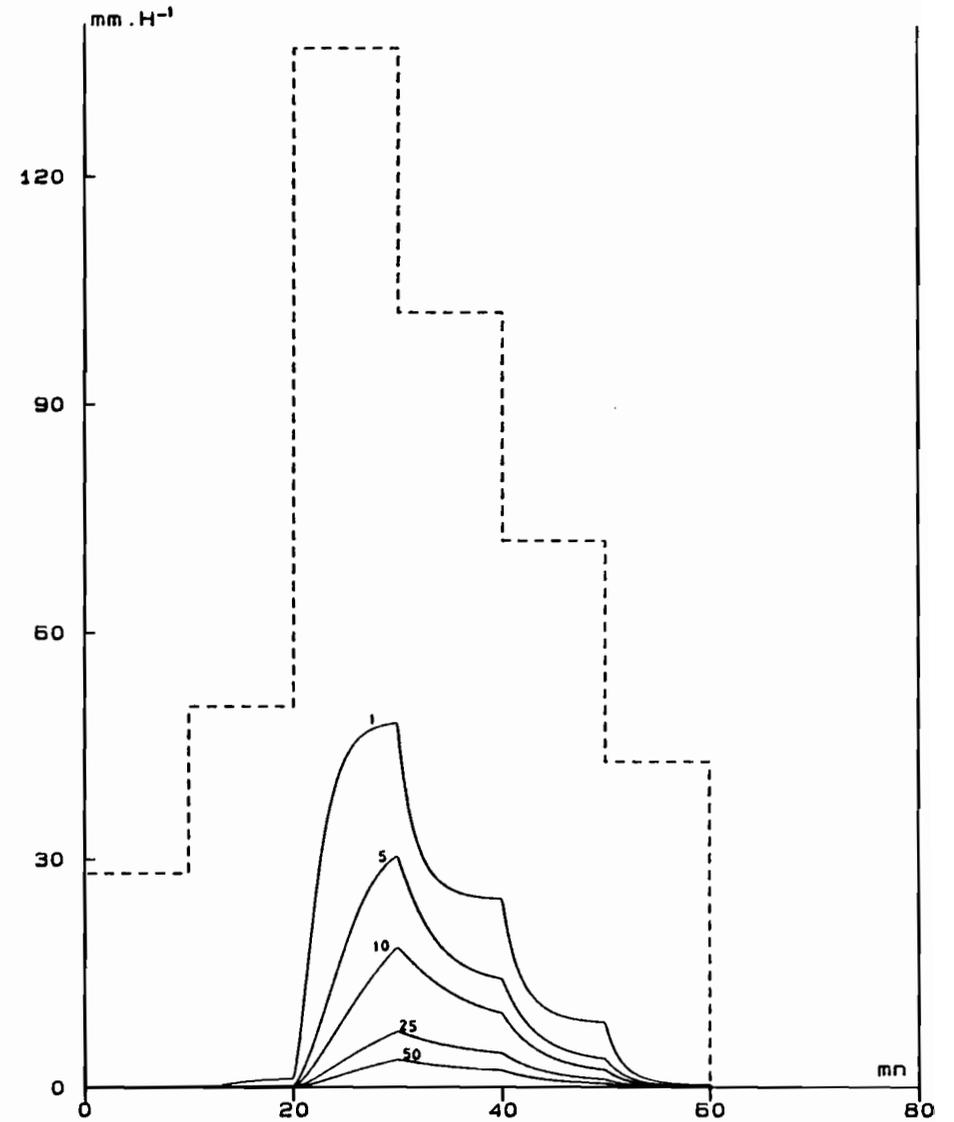
Débit ruisselé



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ----: hyétogramme d'averse.
: courbe obtenue en recyclant le ruissellement

PARCELLE 7 averse 4

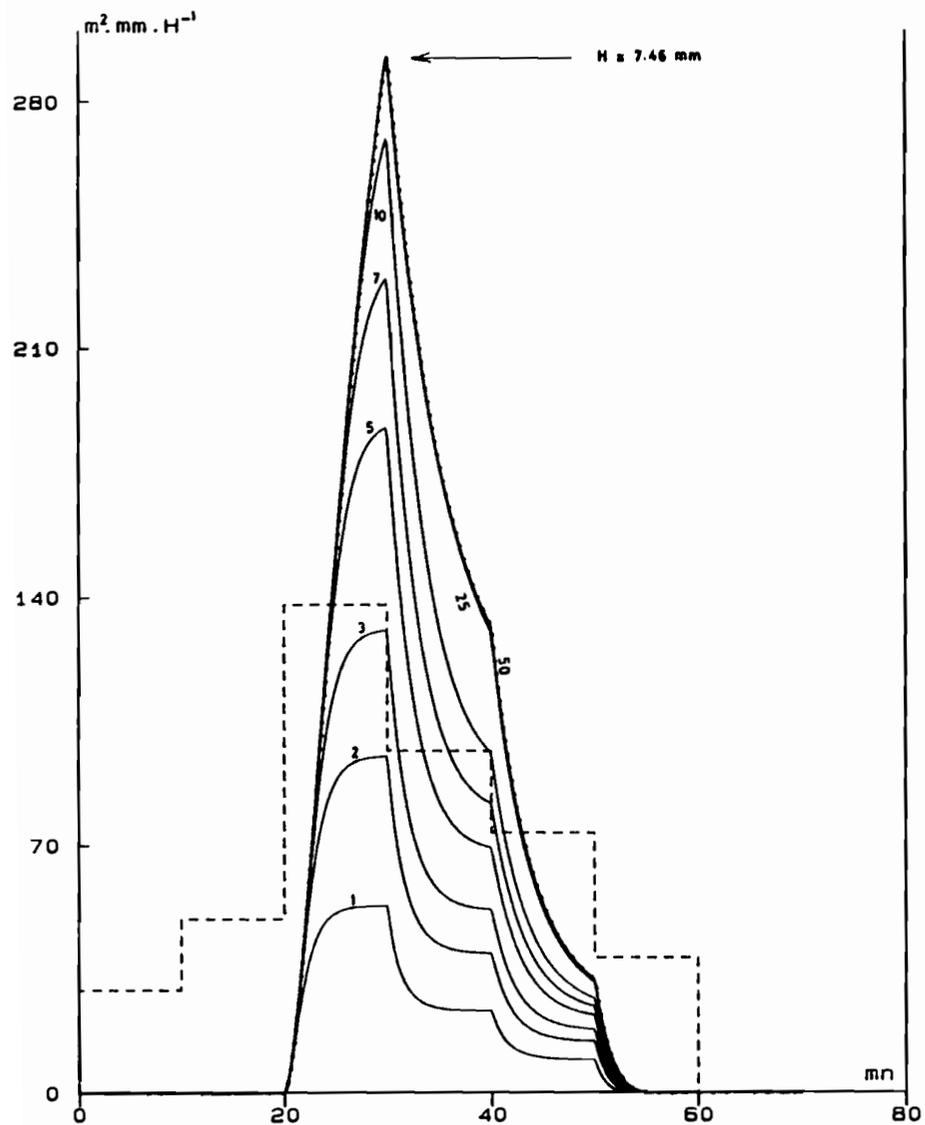
Débit ruisselé divisé par la surface des parcelles



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ----: hyétogramme d'averse.

PARCELLE 8 averse 4

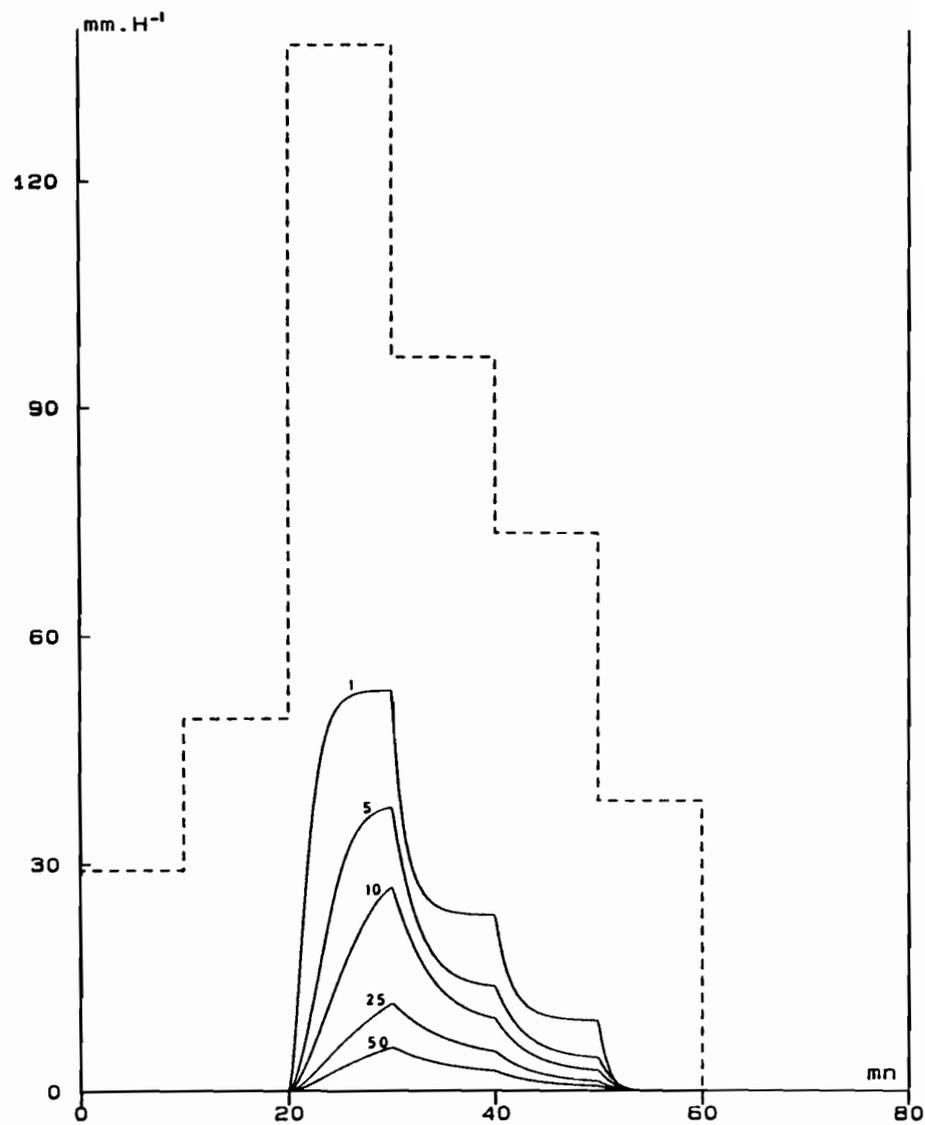
Débit ruisselé



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ----: hyétogramme d'averse.
: courbe obtenue en recyclant le ruissellement

PARCELLE 8 averse 4

Débit ruisselé divisé par la surface des parcelles



La longueur des parcelles est notée près des courbes.
 ----: hyétogramme d'averse.

A N N E X E 4

- Calcul de stabilité de la cuve flottante C3 dans le dispositif de recyclage.
- Calcul de la dénivelée $H_2 - H_3$

Application numérique

On se fixe les valeurs suivantes :

$$R = 16 \text{ cm} ; r = 15,9 \text{ cm} ; S = 16 \text{ cm} ; H = 80 \text{ cm} ; L_0 = 3 \text{ cm}$$

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3 ; \rho_1 = 7,9 \text{ g/cm}^3 ; \rho_2 = 7,9 \text{ g/cm}^3 ; m = 612.n \text{ grammes}$$

Ceci correspond à une cuve flottante en fer, dont les parois font 1 mm d'épaisseur. Le contrepoids de masse m est constitué de n contrepoids de 612 grammes, utilisés habituellement avec les limnigraphes OTT X.

Déterminons maintenant à l'aide de (17), l'épaisseur E du fond nécessaire à la stabilité de l'équilibre, selon la valeur de n :

$$K(L_0) = 2.612.n.96 + \pi \left[\frac{1}{16^2} \left[(16^2 - 15,9^2).80.7,9 + 15,9^2 (3. + 7,9 E) - 612 n / \pi \right]^2 - (16^2 - 15,9^2) 80^2.7,9 - 15,9^2.3.(2E + 3) - 15,9^2 E^2.7,9 \right]$$

$$= 117504 n + 0,0122718 (2774,51 - 194,806 n + 1997,20E)^2 - 513844 - 4765,36E - 6274,39E^2$$

pour $n = 1$: $K(L_0) = -314672 + 121688E + 42675,5E^2 = 42675,5 (E^2 + 2,85E - 7,37)$

$$K(L_0) > 0 \iff E > 1,64 \text{ cm}$$

pour $n = 2$: $K(L_0) = -209037 + 112139E + 42675,5E^2 = 42675,5 (E^2 + 2,63E - 4,90)$

$$K(L_0) > 0 \iff E > 1,26 \text{ cm}$$

pour $n = 3$: $K(L_0) = -102470 + 102590E + 42675,5 E^2 = 42675,5 (E^2 + 2,40E - 2,40)$

$$K(L_0) > 0 \iff E > 0,76 \text{ cm}$$

pour $n = 4$: $K(L_0) = 5028,07 + 93040,5E + 42675,5E^2 = 42675,5 (E^2 + 2,18E + 0,12)$

$$K(L_0) > 0 \quad \forall E.$$

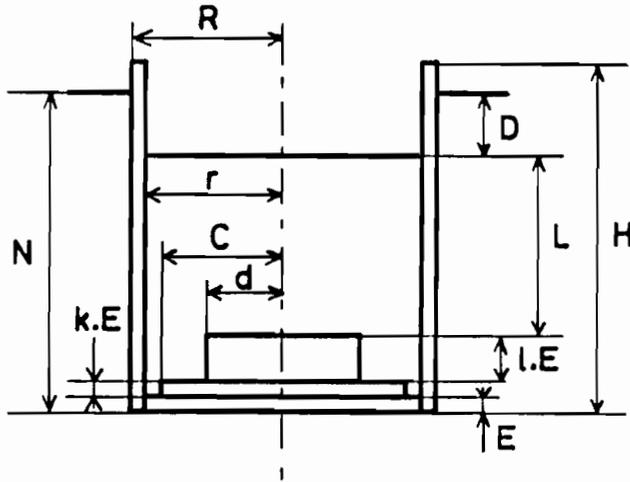
On retient finalement la solution :

$$n = 4 \rightarrow m = 2448 \text{ g}$$

$$E = 1 \text{ cm}$$

Toutes les dimensions de la cuve étant ainsi fixées, l'équation (16) nous donne la valeur de N en fonction de L , ce qui permet de déterminer la dénivelée entre les niveaux d'eau intérieur et extérieur de la cuve flottante. Mais en pratique, il est souhaitable de pouvoir régler cette dénivelée pour l'adapter aux conditions de terrain. C'est pourquoi on prévoit l'adjonction de plaques amovibles circulaires de

1 cm d'épaisseur au fond de la cuve flottante. L'adjonction d'une plaque a pour effet d'augmenter la dénivellée entre les niveaux d'eau, et accessoirement d'augmenter la stabilité de l'équilibre en déplaçant vers le bas le point d'application des forces vers le bas agissant sur la cuve. Ces plaques sont centrées à l'aide d'un orifice central où s'enfile une pointe. Examinons les variations de la dénivellée en fonction du nombre de plaques rajoutées :



L'équation (16) devient alors :

$$\left| \begin{aligned} & \pi(R^2 - r^2) H \rho_1 g + \pi(r^2 E + c^2 k E + d^2 l E) \rho_1 g + \pi(r^2 L + (r^2 - d^2) l E + (r^2 - c^2) k E) \rho g \\ & = Mg + \pi R^2 N g \rho \end{aligned} \right.$$

Application numérique :

on fixe, en plus des valeurs déjà vues plus haut :

$d = 11 \text{ cm}$
$c = 14,9 \text{ cm}$

$$\left| \begin{aligned} & \pi(16^2 - 15,9^2) \cdot 80 \cdot 7,9 + \pi(15,9^2 + 14,9^2 \cdot k + 11^2 l) \cdot 7,9 + \\ & \quad + \pi(15,9^2 \cdot L + (15,9^2 - 11^2) l + (15,9^2 - 14,9^2) k) \\ & = 2448 + \pi \cdot 16^2 N. \end{aligned} \right.$$

$$\rightarrow 10160 + 5607 k + 3417 l + 794 \cdot L - 804 \cdot N = 0$$

$$\rightarrow L = 1,01 N - 7,06 k - 4,30 l - 12,80 \text{ cm}$$

$$N = 0,99 L + 6,97 k + 4,25 l + 12,64 \text{ cm} \quad (A)$$

$$D = N - L - (1 + k + l) E$$

$$\rightarrow D = -0,0126N + 6,06 k + 3,30 l + 11,80 \text{ cm}$$

$$D = -0,0124L + 5,97 k + 3,25 l + 11,64 \text{ cm}$$

Par ailleurs, l'ajout de plaques au fond de C₃ a pour effet de diminuer la course de la cuve entre sa position haute, correspondant à une valeur minimale de L (3 cm), et sa position basse correspondant à un remplissage maximal (N = 76 cm). D'après (A), la course C ainsi définie vaut :

$$C = 76 - (0,99.3 + 6,97 k + 4,25 l + 12,64)$$

$$\longrightarrow \boxed{C = 60,40 - 6,97 k - 4,25 l \text{ cm}}$$

On trouvera ci-dessous les valeurs en centimètres de C et D (position haute et position basse) correspondant aux différentes valeurs de l et k :

k (plaques de rayon 14,9cm)	0	1	1	1	1	1	1	1	1
l (plaques de rayon 11 cm)	0	0	1	2	3	4	5	6	7
D (position haute:L=3cm)	11,6	17,6	20,8	24,1	27,3	30,6	33,8	37,1	40,3
D(position basse):N=76cm	10,8	16,9	20,2	23,5	26,8	30,1	33,4	36,7	40,0
C	60,4	53,4	49,2	44,9	40,7	36,4	32,2	27,9	23,7

Remarque : le volume maximal pouvant être pris en compte entre deux vidanges du dispositif est donné par le produit de C par la section de C₃ (soit 794 cm²).

Calcul du nombre de plaques en fonction de la pente de la parcelle.

La valeur de D correspond à la somme des valeurs suivantes :

- . 1 cm : entre le seuil du déversoir C₄ et le bord du cadre de la parcelle
- . p cm : dénivelée entre les bords du cadre amont et aval de la parcelle
- . 12 cm : entre le bord du cadre et la sortie du collecteur
- . 6 cm : entre la sortie du collecteur et le bord de la cuve C₄
(pour une dénivelée de 5 cm le long de la goulotte)
- . 6 cm : entre le bord de la cuve C₄ et le niveau de l'eau.

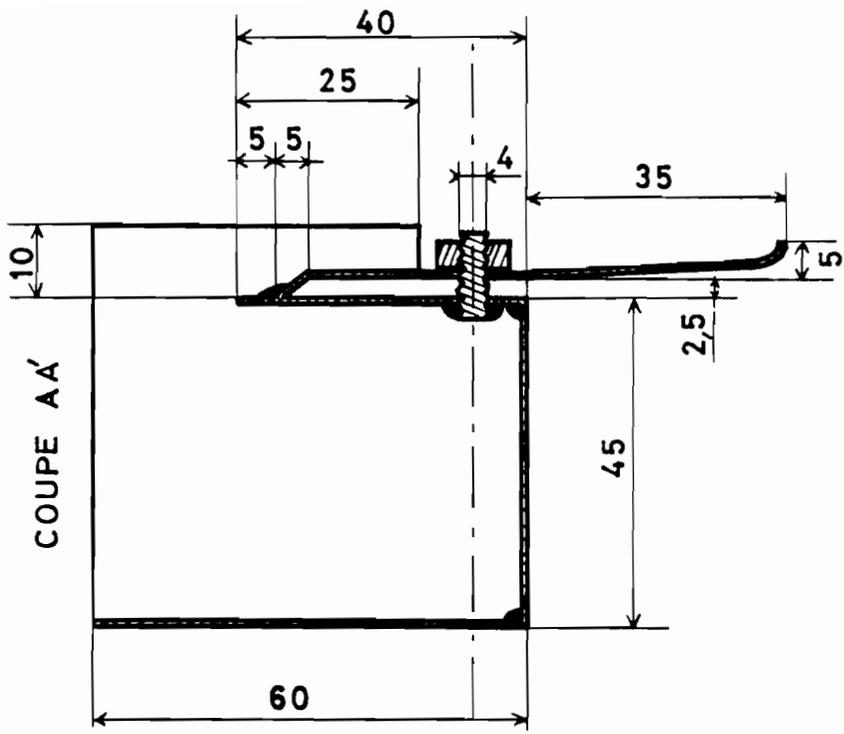
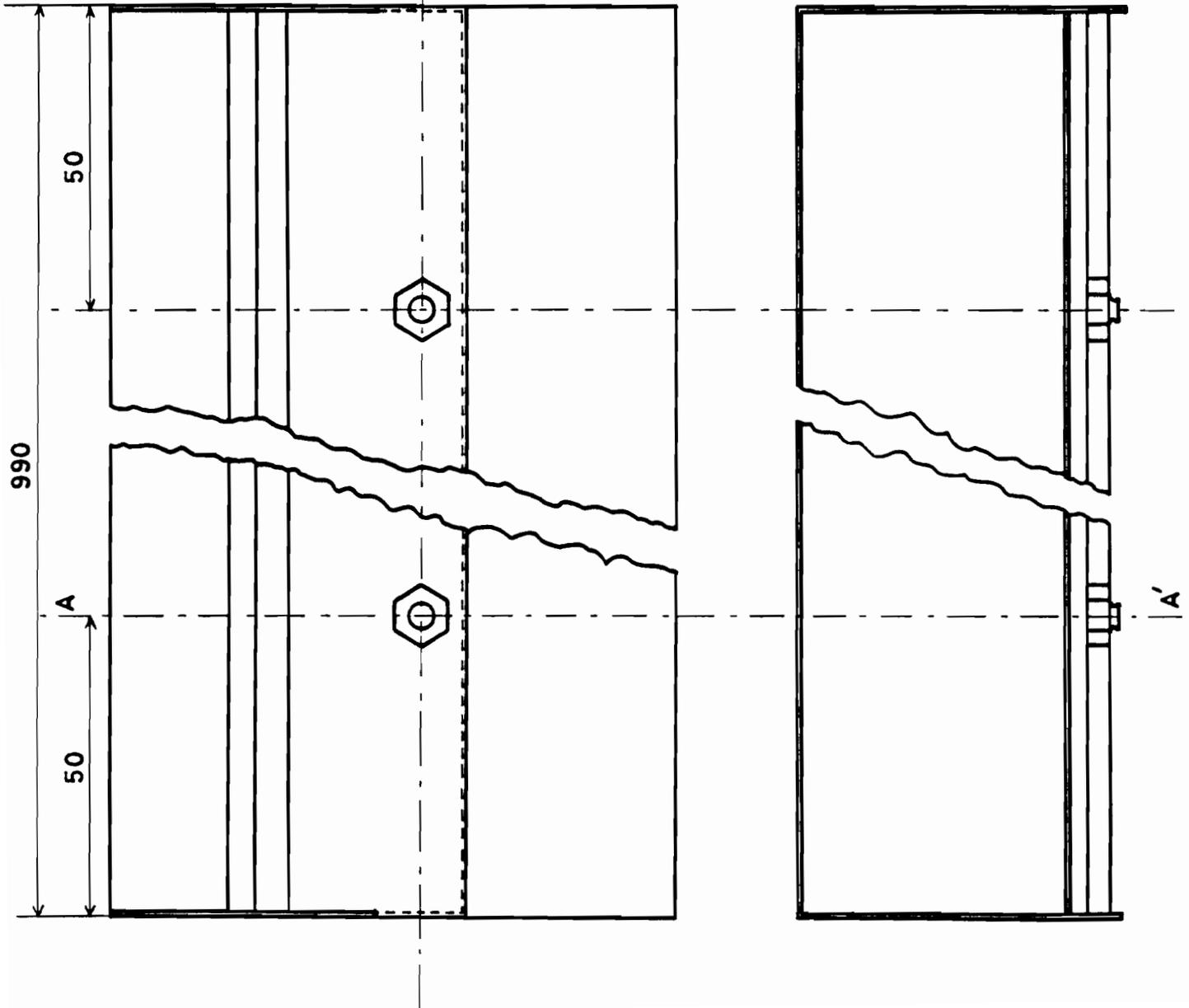
Donc :

$$\boxed{D \geq 25 + p \text{ cm}}$$

Le nombre de plaques est donc déterminé à partir de la pente de la parcelle, en utilisant cette équation et le tableau précédent donnant D (position basse).

A N N E X E 5

Plans des éléments du dispositif de recyclage de ruissellement.

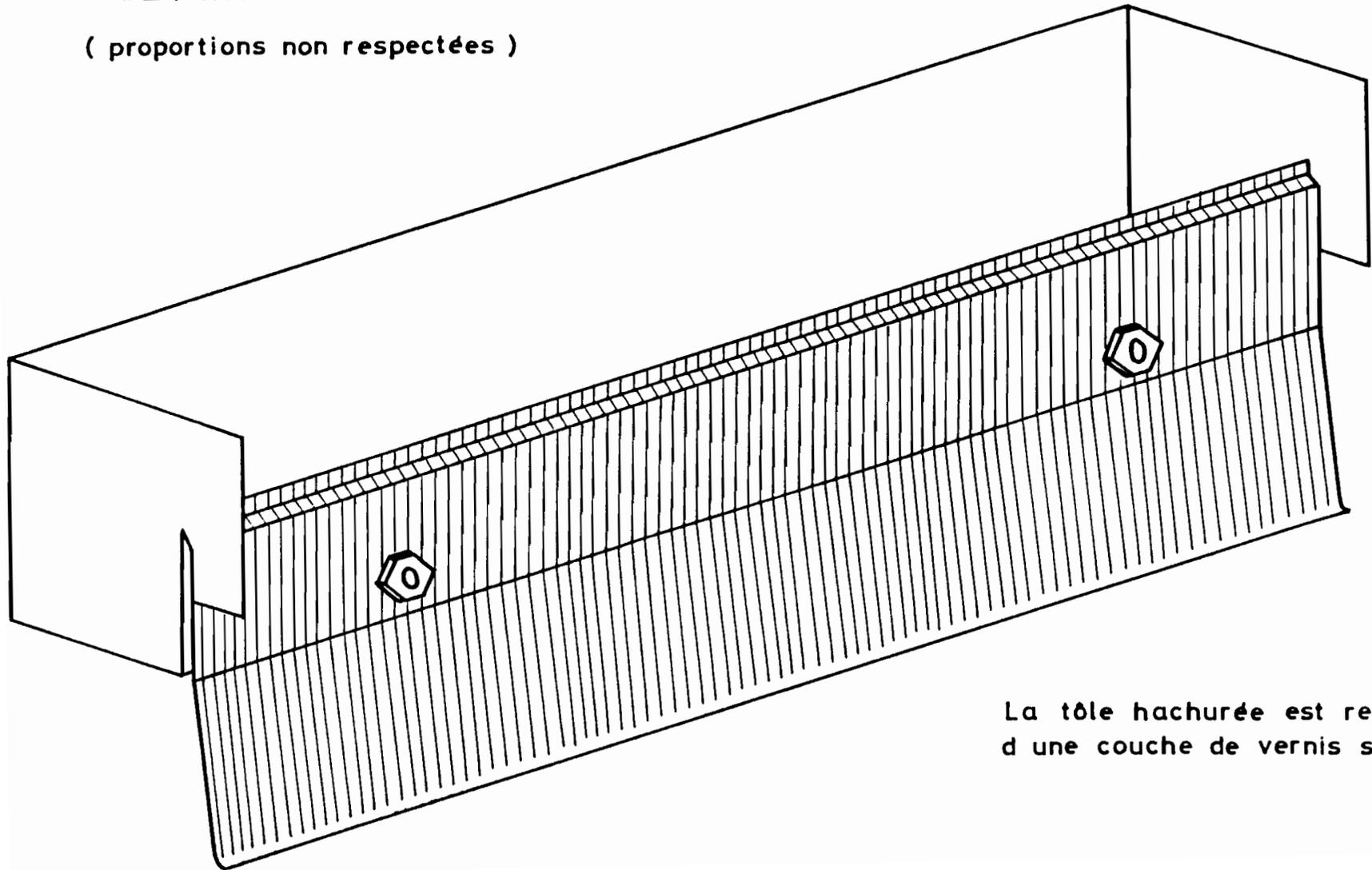


DEVERSOIR C1

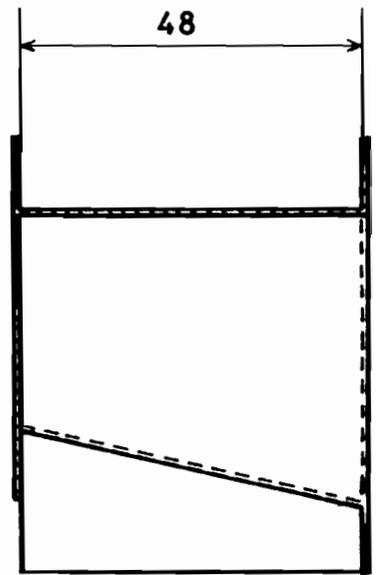
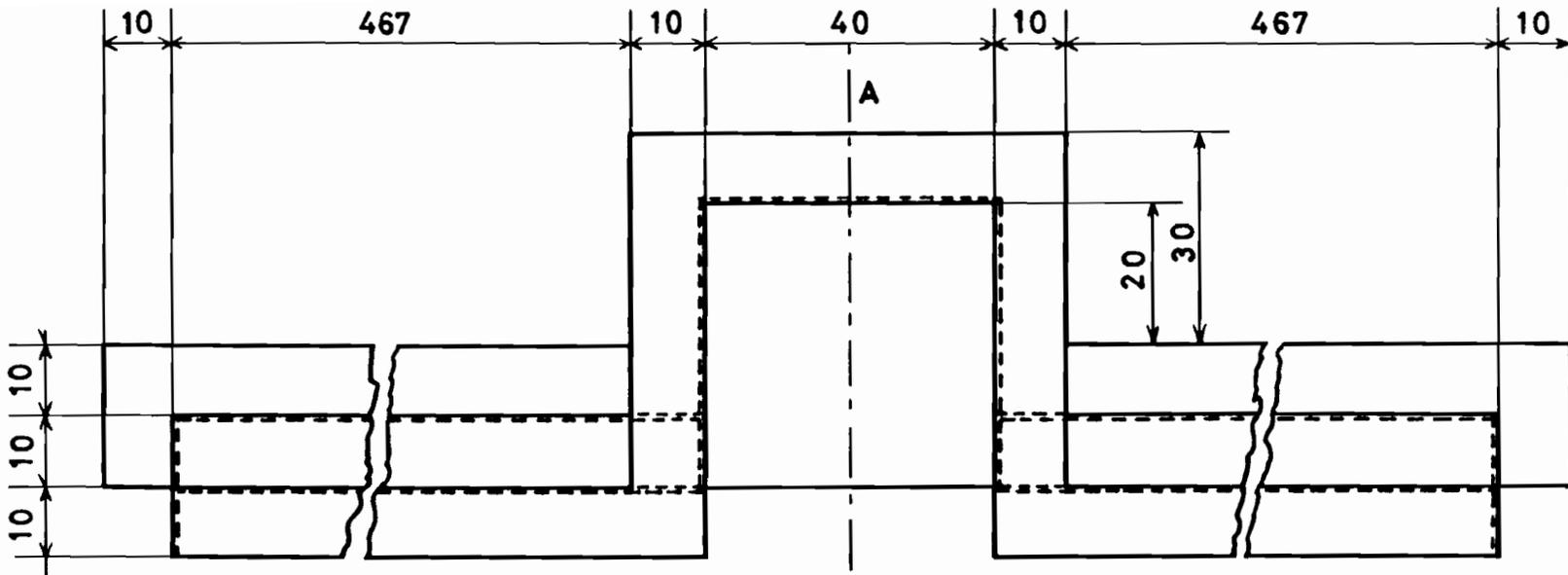
tole de 1 mm

DEVERSOIR C1

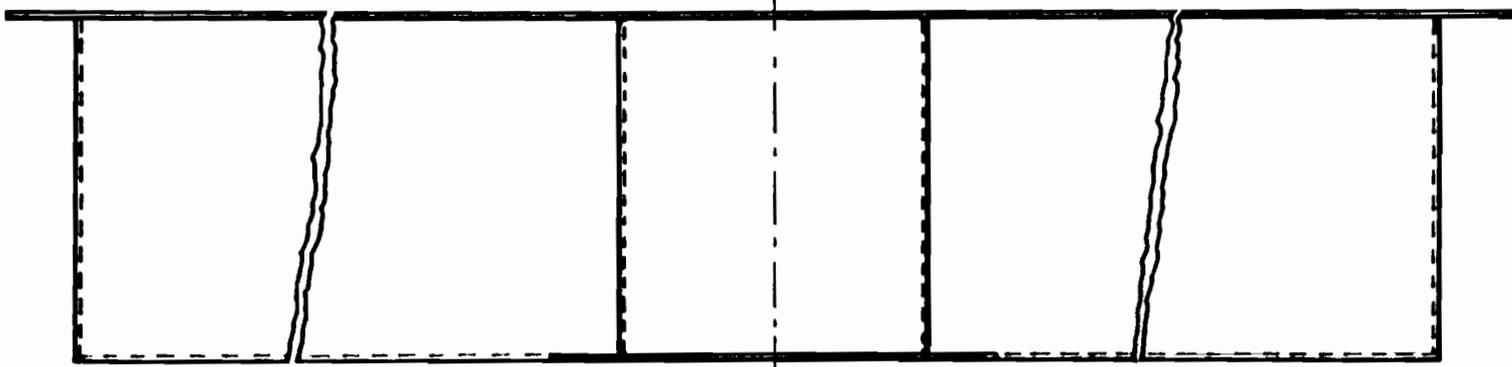
(proportions non respectées)



La tôle hachurée est recouverte
d'une couche de vernis sablée



COUPE AA'



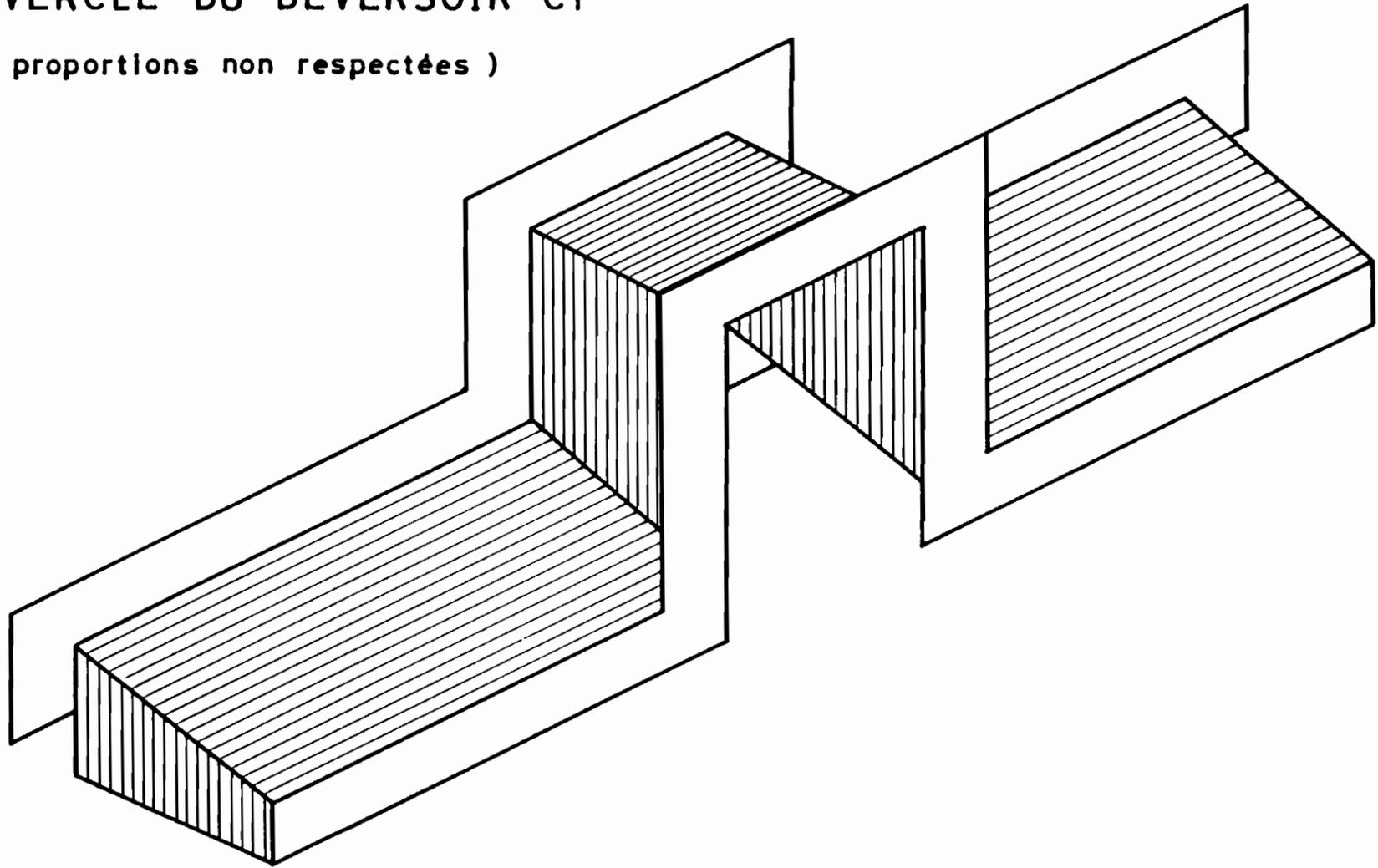
A'

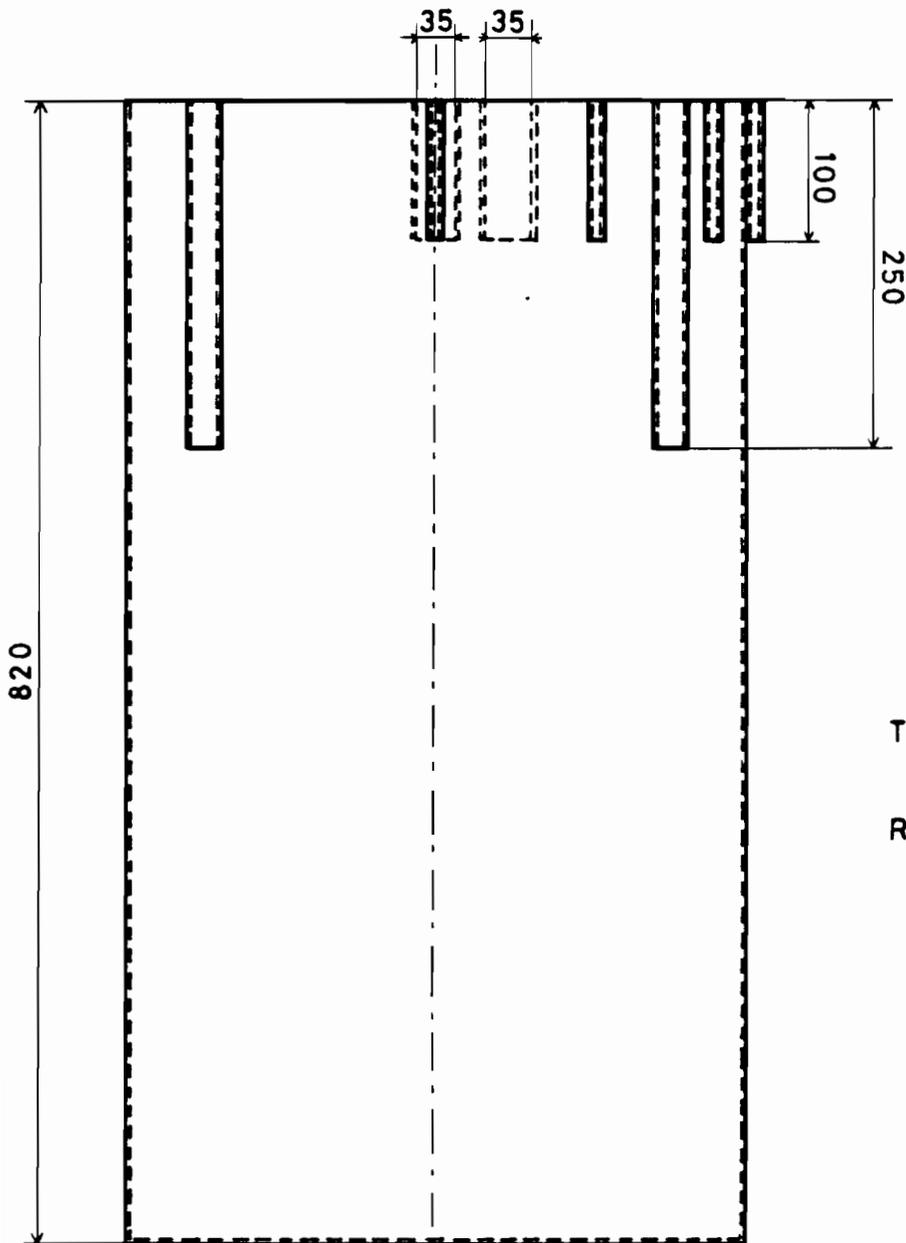
COUVERCLE DU
DEVERSOIR C1

Tôle de 1 mm

COUVERCLE DU DEVERSOIR C1

(proportions non respectées)



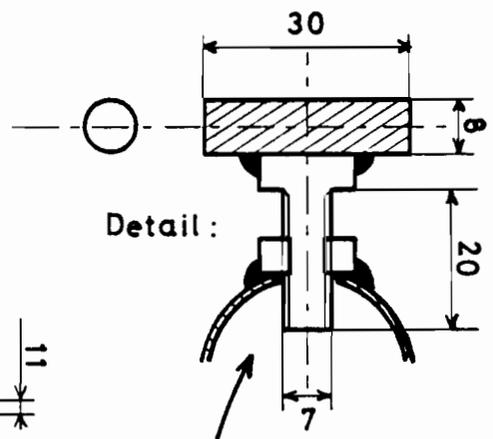
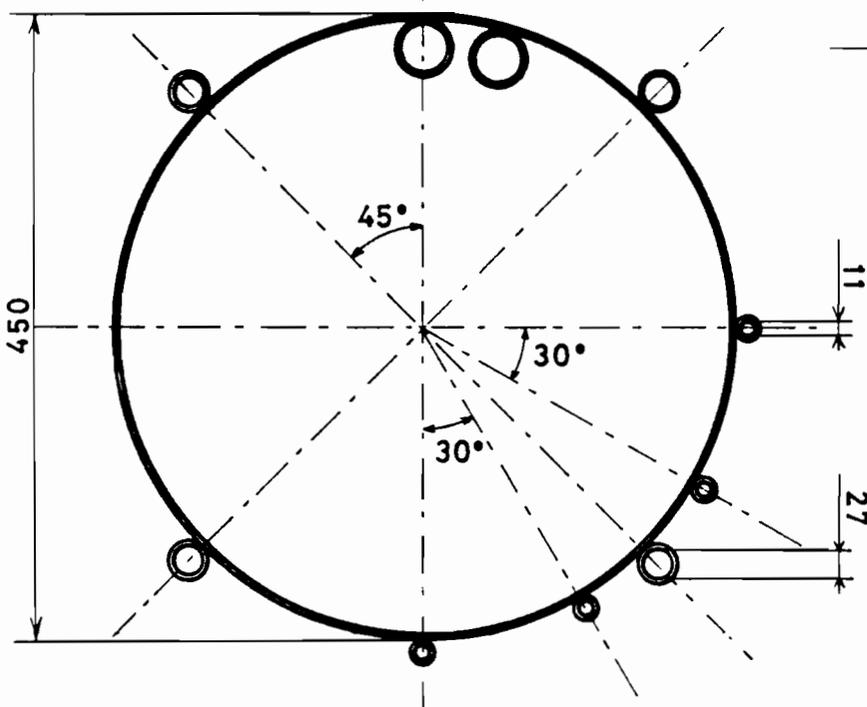


CUVE C2

Tôle de 1mm

Rôle des tubes :

- Ø27 : support de limnigraphe
- Ø11 : support de siphon C4 C3
- Ø35 : guide de siphon C2 C1
guide du tuyau de vidange (refoulement)



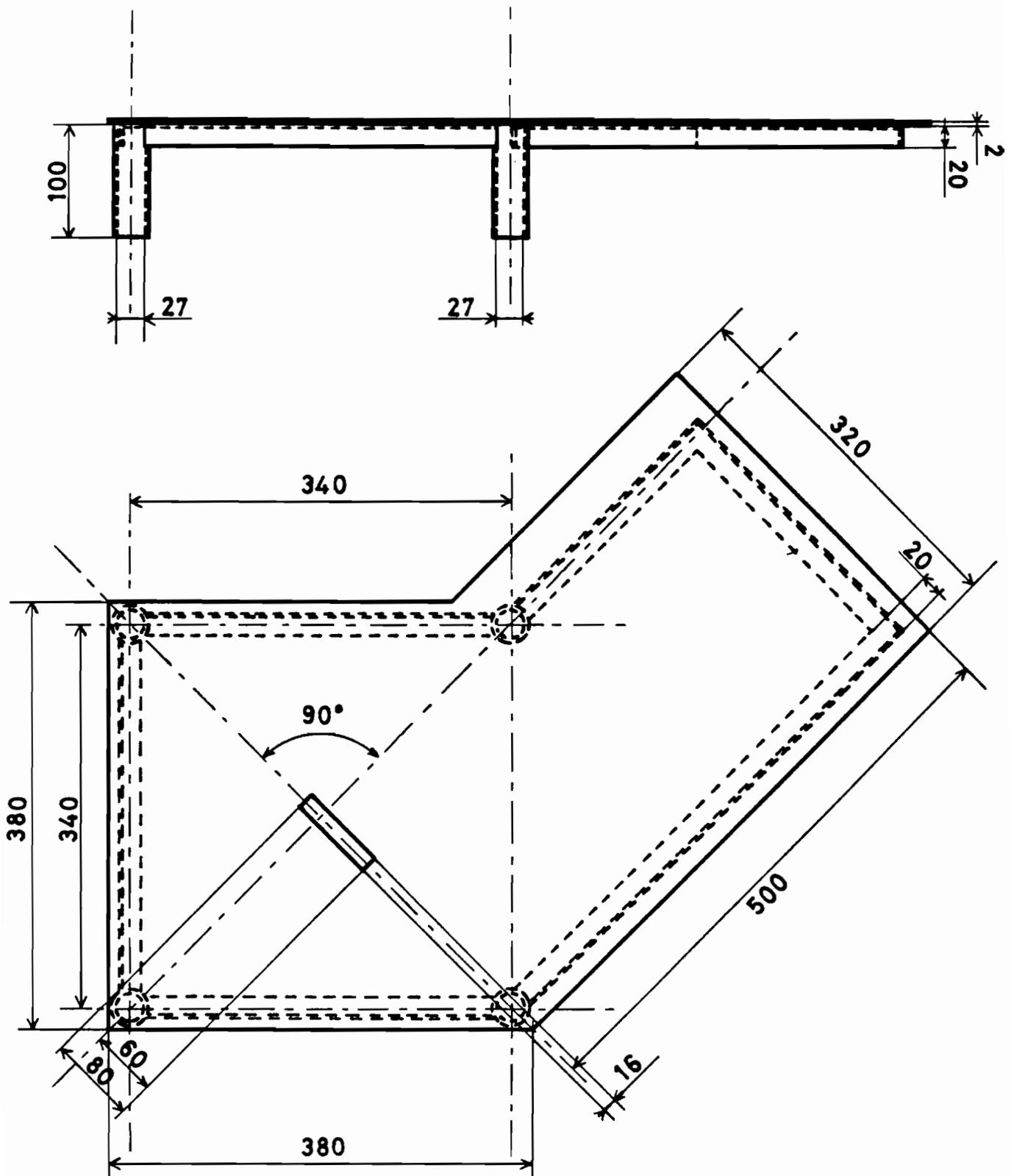
Detail :

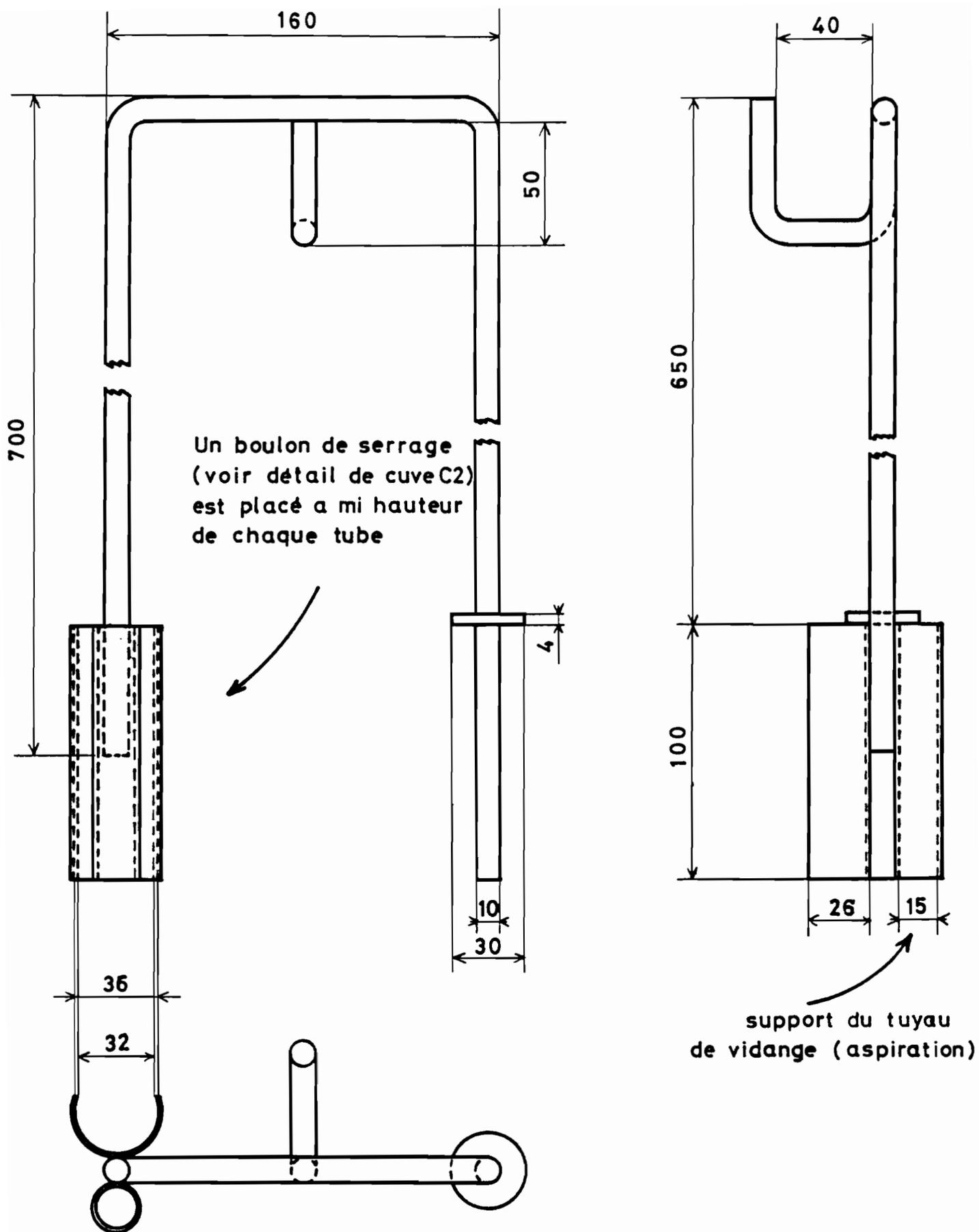
boulon de serrage à papillon, placé à mi-hauteur des tubes Ø27 et Ø11

PLATEAU SUPPORT DE LIMNIGRAPHE

Tôle de 2 mm

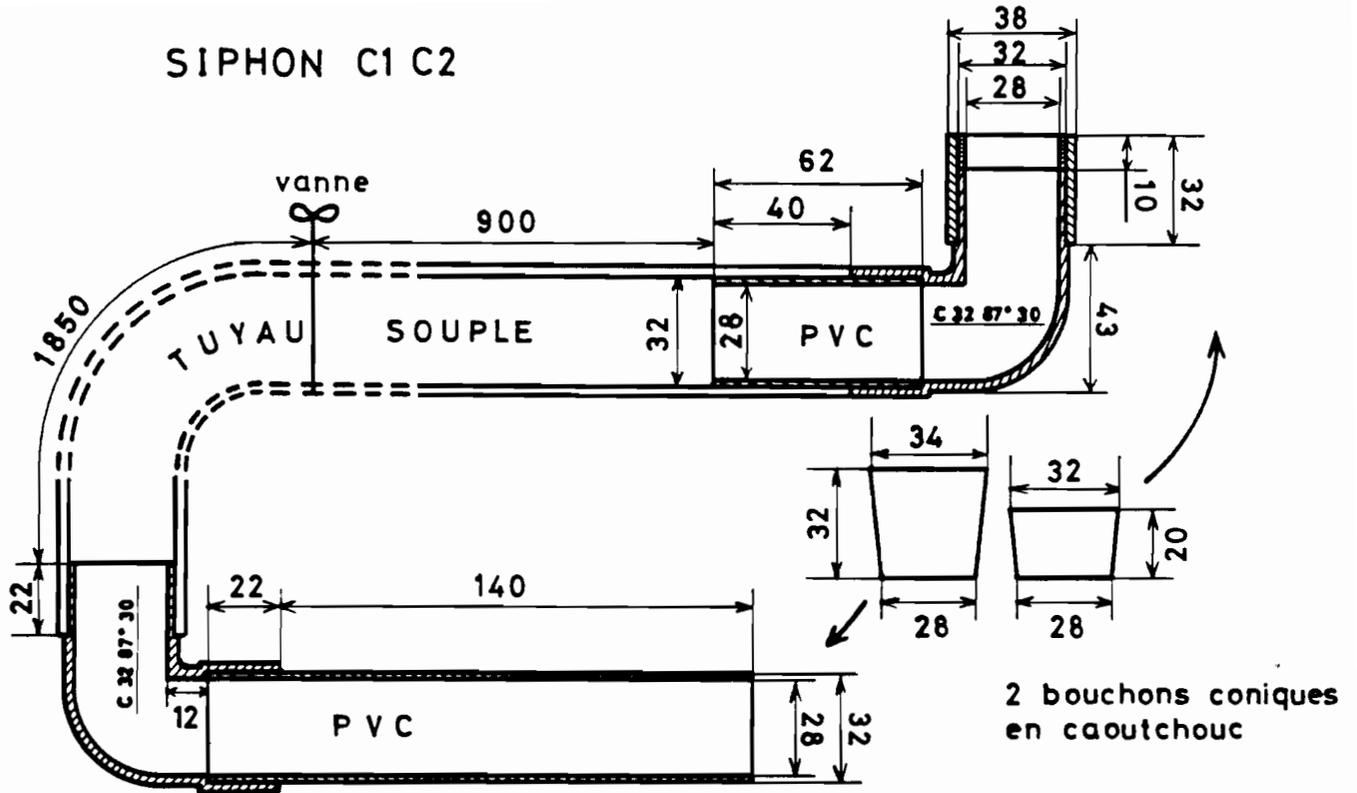
Corniere de 20 mm





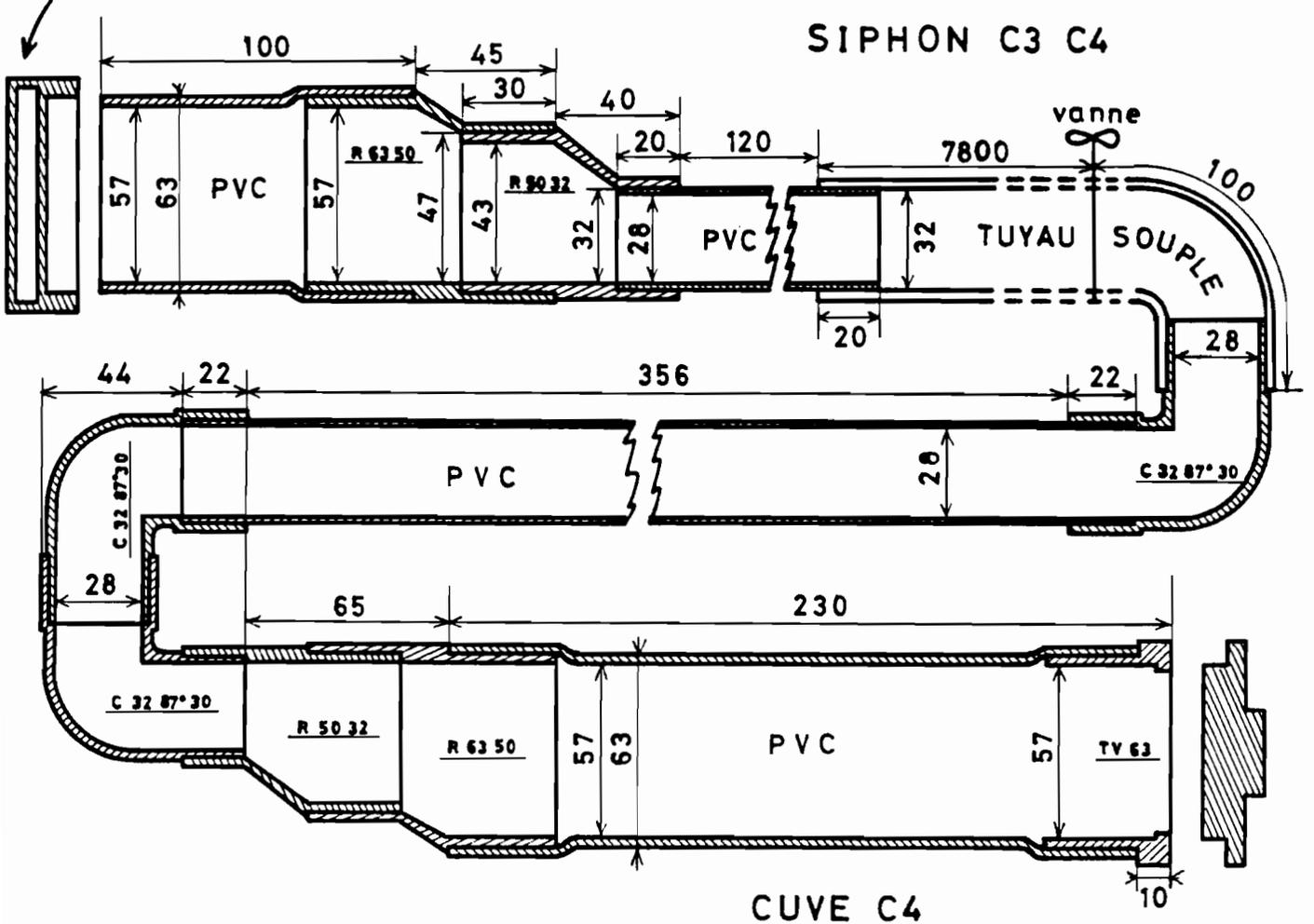
SUPPORT DE SIPHON C4 C3

SIPHON C1 C2

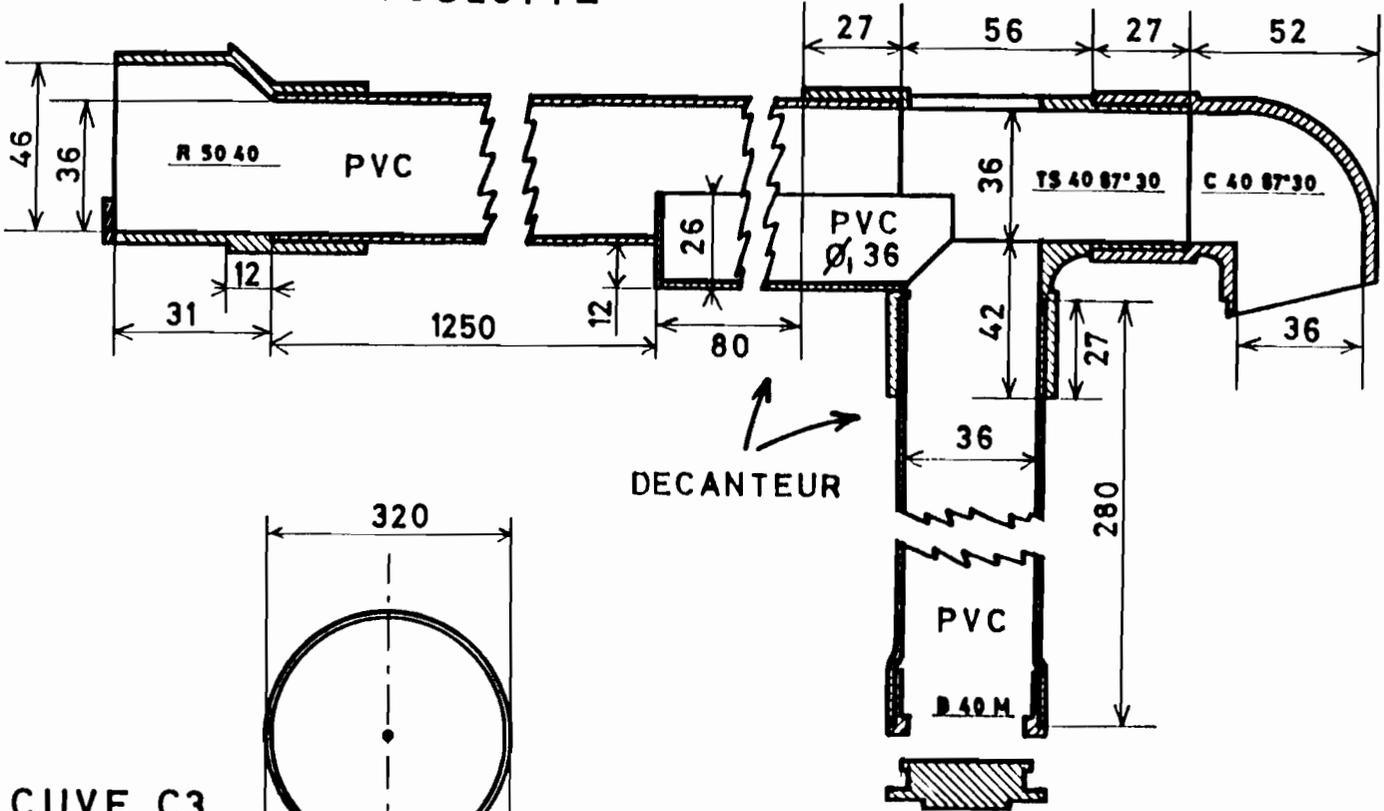


bouchon PVC avec logement pour fer plat (débouchage)

SIPHON C3 C4

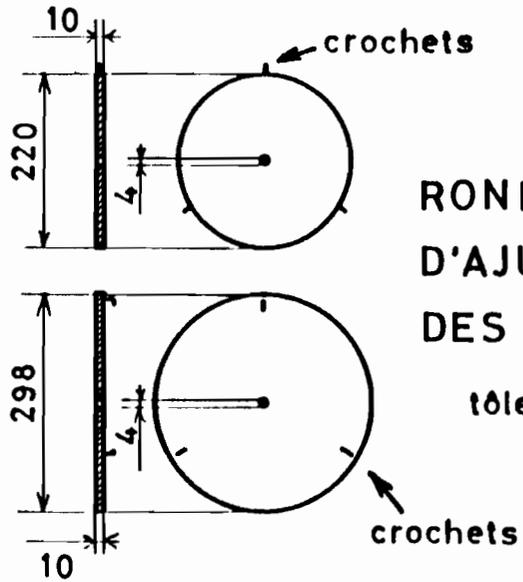
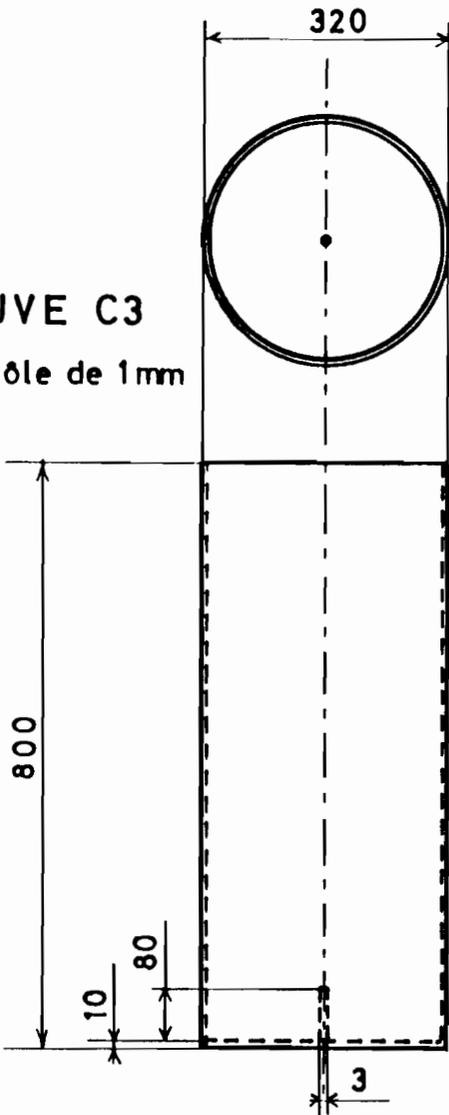


GOULOTTE



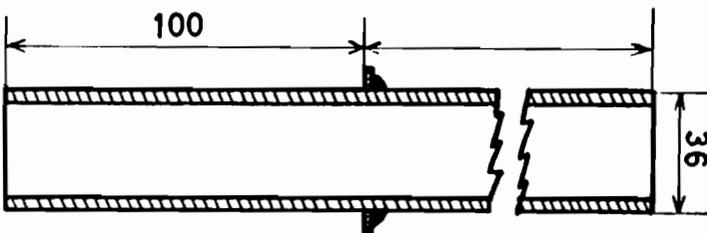
DECANTEUR

CUVE C3
tôle de 1mm



RONDELLES
D'AJUSTEMENT
DES NIVEAUX
tôle de 10 mm

4 PIEDS tube galvanisé



A N N E X E 6

Fonctionnement du dispositif de recyclage

Les notations utilisées sont définies dans la 2ème partie du texte, II, 1).

Le but étant ici d'obtenir des ordres de grandeur, on admettra certaines hypothèses simplificatrices. En particulier, on supposera que les régimes d'écoulement varient suffisamment lentement pour qu'ils puissent être décrits par les équations relatives aux régimes permanents.

A) Equations de l'hydraulique donnant les débits en fonction des niveaux

Déversoir C1

formule de Poleni:
$$Q_1 = \frac{2}{3} L \cdot H_1^{3/2} \cdot \mu \sqrt{2g}$$
 avec: L largeur du déversoir
 μ coeff de contraction

Siphons

Le régime d'écoulement est déterminé par le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{Q \cdot D}{\nu \pi D^2/4} = \frac{4Q}{\nu \pi D}$$

eau à 20°C : $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 tuyau utilisé : $D = 0,028 \text{ m}$
 débit max : $Q = 140 \text{ mm}^3/\text{H} = \frac{0,14}{3600} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\rightarrow Re < \frac{4 \cdot 0,14}{3600 \cdot 10^{-6} \cdot 0,028 \cdot 3,14} = 1768$$

Donc $Re < 2000$

Conclusion : le régime est laminaire dans les tuyaux de diamètre $2r$, et a fortiori dans les extrémités de section S_i .

Les pertes de charge sont négligeables aux extrémités de section S_i . Donc :

formule de Poiseuille :

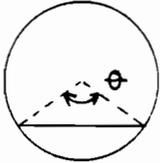
$$H_2 - H_1 = \frac{8 Q_2 \nu l_2}{\pi r^4 g} \quad (2)$$

$$H_4 - H_3 = \frac{8 Q_3 \nu l_3}{\pi r^4 g} \quad (3)$$

avec r : rayon intérieur des tuyaux
 l_2, l_3 : longueurs

goulotte d'évacuation transitant le débit Q_4

$$\text{formule de Chézy : } = c \sqrt{R_H \cdot I} = c \sqrt{\frac{\Omega I}{B}} \rightarrow Q_4 = c \Omega^{3/2} \sqrt{\frac{I}{B}}$$



avec : $\left\{ \begin{array}{l} \Omega : \text{section mouillée} \\ B : \text{périmètre mouillé} \\ R_H : \text{rayon hydraulique} \end{array} \right.$

$$\Omega = \frac{R^2}{2} (\theta - \sin \theta)$$

$$B = R \theta$$

(d'après [5] p. 342).

Pour les débits à évacuer, l'angle θ restera toujours proche de zéro, donc :

$$\sin \theta \approx \theta - \frac{\theta^3}{6}$$

$$\rightarrow \Omega = \frac{R^2}{2} \cdot \frac{\theta^3}{6}$$

$$\rightarrow Q_4 = c \left(\frac{R^2 \cdot \theta^3}{12} \right)^{3/2} \cdot I^{1/2} \cdot (R \theta)^{-1/2} = \frac{C}{12^{3/2}} \cdot R^3 \cdot \theta^{9/2} \cdot I^{1/2} \cdot R^{-1/2} \cdot \theta^{-1/2}$$

$$\rightarrow Q_4 = \frac{C}{12^{3/2}} \cdot R^{5/2} \cdot \theta^4 \cdot I^{1/2} \rightarrow \theta = \left[\frac{12^{3/2} \cdot Q_4}{C R^{5/2} I^{1/2}} \right]^{1/4}$$

$$\rightarrow \Omega = \frac{R^2}{12} \cdot \left[\frac{12^{3/2} \cdot Q_4}{C R^{5/2} I^{1/2}} \right]^{3/4} = 12^{1/8} \cdot R^{1/8} \cdot Q_4^{3/4} \cdot C^{-3/4} \cdot I^{-3/8}$$

$$\Omega = \left(\frac{12 \cdot R}{C^6 \cdot I^3} \right)^{1/8} \cdot Q_4^{3/4}$$

C : coefficient de Chézy
R : rayon intérieur de la goulotte
I : pente.

(4)

B) Equations traduisant la conservation des volumes

Déversoir C_1

$$Q_2 = Q_1 + (S_1 - s_e) \frac{dH_1}{dt} \quad (5)$$

avec s_e : section extérieure du tuyau

cuve principale C_2

$$Q_2 + \frac{dH_2}{dt} \cdot (S_2 - S_{3e} - s_e) = - S_{3e} \frac{dH_c}{dt} \quad (6)$$

cuve flottante C₃

$$Q_3 = [S_{3i} - S_e] \frac{dH_3}{dt} - S_{3i} \cdot \frac{dH_c}{dt} \quad (7)$$

siphon amont C₄

$$Q_4 = S_i \frac{dH_4}{dt} + Q_3 \quad (8)$$

goulotte d'évacuation

$$Q_5 = l_5 \cdot \frac{d\Omega}{dt} + Q_4 \quad (9)$$

C) Equation traduisant la cinématique de la cuve flottante

La cuve est soumise aux forces extérieures suivantes :

vers le haut :	$m g$ (contrepois) $S_{3e} (H_2 - H_c) \rho g$ (poussée d'Archimède)
vers le bas :	$M g$ (poids de la cuve) $(H_3 - H_c - e) S_{3i} \rho g$ (poids de l'eau dans la cuve).

La cuve se déplaçant à une vitesse très faible, le terme :

$$M \gamma = M \frac{d^2 H_c}{dt^2}$$

est infiniment petit du deuxième ordre et peut donc être négligé dans l'équation

$$F = M \gamma \quad . \text{Donc :}$$

$$m g + S_{3e} (H_2 - H_c) \rho g = M g + (H_3 - H_c - e) S_{3i} \rho g$$

$$\rightarrow (M - m) + [(H_3 - (H_c + e)) S_{3i} - (H_2 - H_c) \cdot S_{3e}] \rho = 0$$

$$(M - m - e \rho S_{3i}) \cdot \frac{1}{\rho} + H_3 \cdot S_{3i} - H_2 \cdot S_{3e} + H_c \cdot (S_{3e} - S_{3i}) = 0 \quad (10)$$

avec :	M : masse de cuve flottante m : masse du contrepois ρ : masse volumique de l'eau.
--------	--

D) Le régime permanent

Le fonctionnement du dispositif, en régime proche du régime permanent, est décrit d'après ce qui précède par un système de 10 équations dont les inconnues, variables avec le temps, sont :

$$H_1, H_2, H_3, H_4, H_c, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, \Omega$$

Faisons l'hypothèse que : Q_1, Q_2, Q_3 et Q_4 soient constants, ainsi que Q_5 . On applique alors chacune des 10 équations afin de vérifier si ces conditions sont possibles, ainsi que pour déterminer les 6 autres variables.

$$(1) \rightarrow H_1 = \left[\frac{3 Q_1}{2L \mu \sqrt{2g}} \right]^{2/3} \quad (11)$$

$$(2) \rightarrow H_2 = H_1 + \frac{8 Q_2 \sqrt{l_2}}{\pi r^4 g} \rightarrow H_2 = \left[\frac{3 Q_1}{2L \mu \sqrt{2g}} \right]^{2/3} + \frac{8 Q_2 \sqrt{l_2}}{\pi r^4 g} \quad (12)$$

$$(5) + (11) \rightarrow Q_2 = Q_1 \quad (13)$$

$$(6) + (12) \rightarrow Q_2 = -S_{3e} \cdot \frac{dH_c}{dt} \quad (14)$$

$$(10) + (12) \rightarrow S_{3i} \cdot \frac{dH_3}{dt} + (S_{3e} - S_{3i}) \frac{dH_c}{dt} = 0 \rightarrow \frac{dH_c}{dt} = \frac{S_{3i}}{S_{3i} - S_{3e}} \cdot \frac{dH_3}{dt} \quad (15)$$

$$(14) + (15) \rightarrow Q_2 = \frac{S_{3e} \cdot S_{3i}}{S_{3e} - S_{3i}} \cdot \frac{dH_3}{dt} \quad (16)$$

$$(7) + (15) \rightarrow Q_3 = (S_{3i} - S_e) \frac{dH_3}{dt} + \frac{S_{3i}^2}{S_{3e} - S_{3i}} \frac{dH_3}{dt} = \frac{(S_{3i} - S_e) S_{3e} + S_e S_{3i}}{S_{3e} - S_{3i}} \frac{dH_3}{dt} \quad (17)$$

$$(8) + (3) \rightarrow Q_4 = S_i \frac{dH_3}{dt} + Q_3 \xrightarrow{(17)} Q_4 = \frac{S_i (S_{3e} - S_{3i}) + (S_{3i} - S_e) S_{3e} + S_e S_{3i}}{S_{3e} - S_{3i}} \frac{dH_3}{dt} \quad (18)$$

$$(18) + (16) \rightarrow Q_4 = \frac{(S_{3e} - S_{3i}) \cdot S_i (S_{3e} - S_{3i}) + (S_{3i} - S_e) S_{3e} + S_e S_{3i}}{S_{3e} \cdot S_{3i}} \cdot Q_2$$

$$Q_4 = \left[1 - \frac{(S_e - S_i) \cdot (S_{3e} - S_{3i})}{S_{3e} \cdot S_{3i}} \right] \cdot Q_2 \quad (19)$$

$$(4) + (9) \rightarrow Q_5 = Q_4 \quad (20)$$

$$(17) + (16) \rightarrow Q_3 = \frac{(S_{3i} - S_e) S_{3e} + S_e \cdot S_{3i}}{S_{3e} - S_{3i}} \cdot \frac{S_{3e} - S_{3i}}{S_{3e} \cdot S_{3i}} \cdot Q_2 = \left(1 + S_e \frac{(S_{3i} - S_{3e})}{S_{3e} \cdot S_{3i}} \right) Q_2$$

$$Q_3 = \left[1 + \frac{S_e (S_{3i} - S_{3e})}{S_{3i} \cdot S_{3e}} \right] \cdot Q_2 \quad (21)$$

Conclusion : il y a régime permanent si et seulement si :

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_1 & H_1 &= \left[\frac{3 Q_1}{2L \mu \sqrt{2g}} \right]^{2/3} \\ Q_3 &= \left[1 + \frac{S_e (S_{3i} - S_{3e})}{S_{3i} \cdot S_{3e}} \right] \cdot Q_1 & H_2 &= \left[\frac{3 Q_1}{2L \mu \sqrt{2g}} \right]^{2/3} + 8 \frac{Q_1 \sqrt{l_2}}{\pi r^4 g} \\ Q_4 &= Q_5 = \left[1 - \frac{(S_e - S_i) \cdot (S_{3e} - S_{3i})}{S_{3e} \cdot S_{3i}} \right] \cdot Q_1 & \frac{dH_3}{dt} &= \frac{(S_{3e} - S_{3i})}{S_{3e} \cdot S_{3i}} \cdot Q_1 \\ \Omega &= \left[\frac{12 \cdot R}{C^6 \cdot I^3} \right]^{1/8} \cdot Q_4^{3/4} & \frac{dH_c}{dt} &= - \frac{1}{S_{3e}} \cdot Q_1 \\ H_4 &= H_3 + 8 Q_3 \sqrt{l_3} / (\pi r^4 g) \end{aligned}$$

Par conséquent, il est possible d'avoir $Q_1 = Q_5$ en régime permanent, si on impose : $(S_e - S_i) \cdot (S_{3e} - S_{3i}) = 0$ (ou $\ll S_{3e} \cdot S_{3i}$).

E) Calcul du volume d'eau stocké pour passer de $Q_1 = 0$ à $Q_1 = Q_5$ constant

- système sans écoulement :

$$\begin{aligned} H_{1,0} &= H_{2,0} = 0 \\ H_{3,0} &= H_{4,0} \end{aligned}$$

$$H_{c,0} = [S_{3e} \cdot H_{2,0} - H_{3,0} \cdot S_{3i} - (M - m - e \rho S_{3i}) / \rho] \frac{1}{S_{3e} - S_{3i}}$$

$$(10) \rightarrow H_{c,0} = - (H_{3,0} \cdot S_{3i} + (M - m - e \rho S_{3i}) / \rho) \cdot \frac{1}{S_{3e} - S_{3i}}$$

- volume stocké : $V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$, avec :

$$V_1 = (H_1 - H_{1,0}) \cdot (S_1 - s_e) \rightarrow V_1 = H_1 \cdot (S_1 - s_e) \quad \text{déversoir C1}$$

$$V_2 = (H_2 - H_{2,0}) \cdot (S_2 - s_e - S_{3e}) + (H_c - H_{c,0}) \cdot S_{3e}$$

$$\rightarrow V_2 = H_2 \cdot (S_2 - s_e - S_{3e}) + (H_c - H_{c,0}) \cdot S_{3e}$$

cuve principale C2

$$V_3 = (H_3 - H_{3,0}) \cdot (S_{3i} - S_e) - (H_c - H_{c,0}) \cdot S_{3i} \quad \text{cuve flottante C3}$$

$$V_4 = (H_4 - H_{4,o}) \cdot S_i \quad \text{siphon } C_4$$

$$V_5 = l_5 \cdot \Omega \quad \text{goulotte}$$

$$V_1 = \left[\frac{3Q}{2L \mu \sqrt{2g}} \right]^{2/3} \cdot (S_1 - s_e)$$

$$V_2 + V_3 + V_4 = H_2 \cdot (S_2 - s_e - S_{3e}) + (H_c - H_{c,o}) \cdot (S_{3e} - S_{3i}) \\ + (H_3 - H_{3,o}) \cdot (S_{3i} - S_e) + (H_4 - H_{4,o}) \cdot S_i$$

$$H_c - H_{c,o} = \frac{1}{S_{3e} - S_{3i}} (H_2 \cdot S_{3e} - (H_3 - H_{3,o}) S_{3i}) \quad (\text{d'après (10)})$$

$$H_4 = H_3 + \frac{8Q_3 \sqrt{l_3}}{\pi r^4 g}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow V_2 + V_3 + V_4 &= H_2 \cdot (S_2 - s_e - S_{3e}) + H_2 \cdot S_{3e} - (H_3 - H_{3,o}) \cdot S_{3i} + (H_3 - H_{3,o}) \cdot (S_{3i} - S_e) \\ &+ \left(H_3 + \frac{8Q_3 \sqrt{l_3}}{\pi r^4 g} - H_{4,o} \right) \cdot S_i \\ &= H_2 (S_2 - s_e) + (S_i - S_e) \cdot (H_3 - H_{3,o}) + \frac{8Q \sqrt{l_3}}{\pi r^4 g} \cdot S_i \\ &= H_2 (S_2 - s_e) + \frac{8Q \sqrt{l_3}}{\pi r^4 g} \cdot S_i \end{aligned}$$

$$\rightarrow V = \left[\frac{3Q}{2L \mu \sqrt{2g}} \right]^{2/3} \cdot (S_1 - 2s_e + S_2) + \frac{8Q \sqrt{l_2}}{\pi r^4 g} \cdot (S_2 - s_e) + \frac{8Q \sqrt{l_3}}{\pi r^4 g} \cdot S_i + l_5 \cdot \Omega$$

$$\text{Notons : } A = \left[\frac{3Q}{2L \mu \sqrt{2g}} \right]^{2/3} \cdot (S_1 + S_2 - 2s_e)$$

$$B = \frac{8Q \sqrt{l_2}}{\pi r^4 g} \cdot (S_2 - s_e)$$

$$C' = \frac{8Q \sqrt{l_3}}{\pi r^4 g} \cdot S_i$$

$$D = l_5 \cdot \Omega$$

$$\text{Donc : } V = A + B + C' + D$$

Application numérique :

$$\left. \begin{aligned} L &= 1 \text{ m} \\ g &= 9,81 \text{ m/s}^2 \\ S_1 &= 1 \times 0,05 = 0,05 \text{ m}^2 \\ S_2 &= (0,442)^2/4 = 0,153439 \\ s_e &= (0,0315)^2/4 = 0,000779 \end{aligned} \right\} A = 0,09808 \left(\frac{Q}{\mu} \right)^{2/3}$$

$$\left. \begin{aligned} r &= 0,01225 \text{ m} \\ &= 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ S_i &= \pi (0,058)^2/4 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} B &= 1,7597 Q l_2 \\ C' &= 0,03046 Q l_3 \end{aligned}$$

Le volume D stocké dans la goulotte, peut être estimé par :

$$\Omega = \frac{R^2}{2} (\theta - \sin \theta) = \frac{0,02^2}{2} (\theta - \sin \theta) = 0,0002 (\theta - \sin \theta)$$

$$B = R \theta = 0,02 \theta$$

$$Q = C \cdot \Omega^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{I}{B}} = C \Omega \sqrt{R_H \cdot I}, \text{ avec } R_H = \frac{\Omega}{B}$$

$$C = \frac{87}{1 + \frac{0,06}{\sqrt{R_H}}} \quad (\text{formule de Bazin})$$

Les valeurs de D en fonction de Q sont données dans le tableau suivant, pour une pente I de 5 % :

θ	$\pi/4$	$5\pi/16$	$3\pi/8$	$7\pi/16$	$15\pi/32$	$13\pi/32$
Ω (10^{-4} m^2)	0,16	0,30	0,51	0,79	0,95	0,64
B (m)	0,016	0,020	0,024	0,027	0,029	0,026
R_H (10^{-3} m)	1,00	1,50	2,13	2,93	3,27	2,46
C	30,03	34,13	37,82	41,26	42,45	39,37
Q ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)	3,40	8,87	19,9	39,4	51,6	27,9
Q ($\text{m}^2 \cdot \text{mm}/\text{H}$)	12,2	31,9	71,7	142	185	100

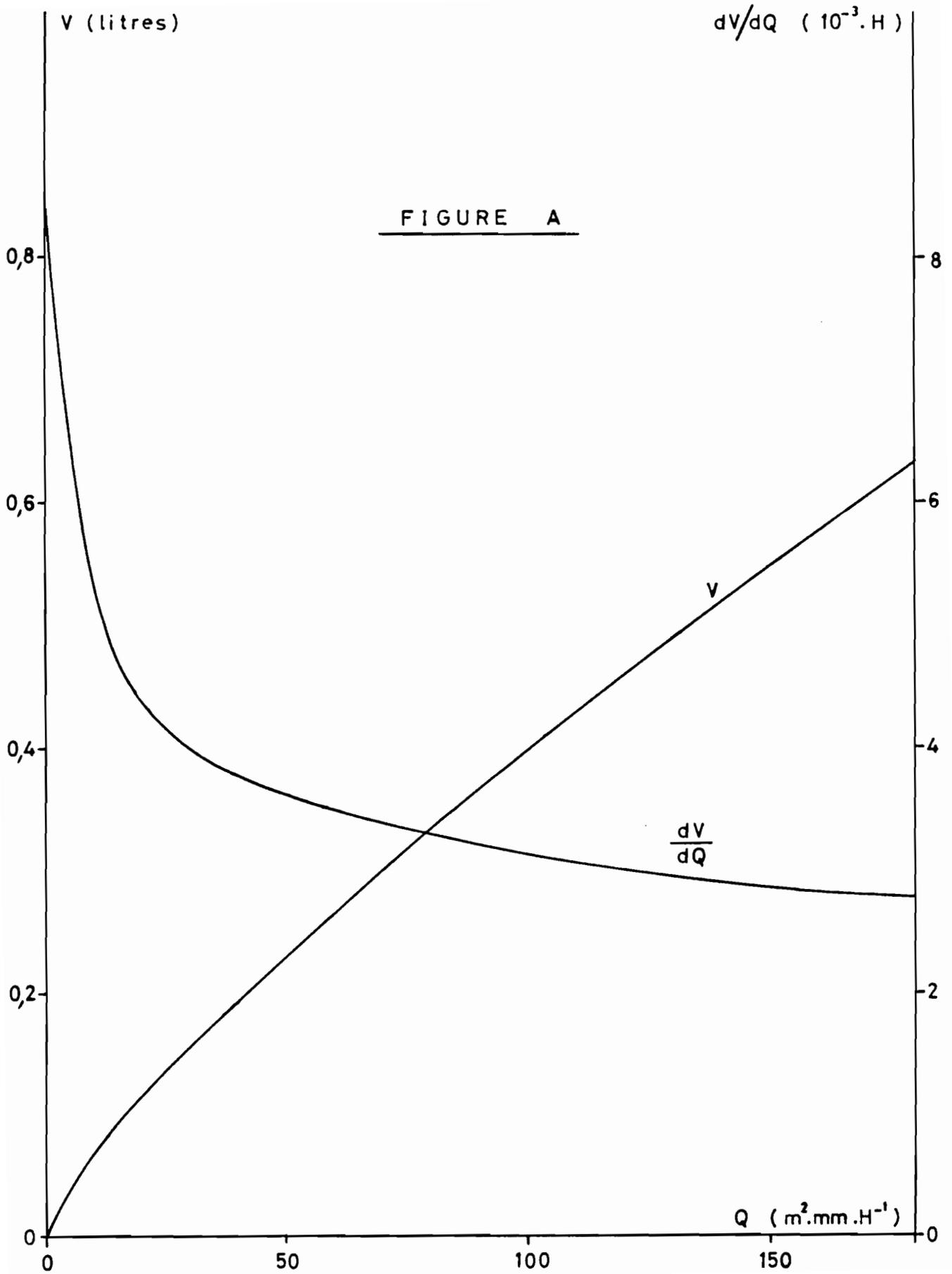
Les valeurs de B et C' nous montrent qu'on a intérêt à diminuer au maximum la longueur l_2 dans le circuit des siphons, afin d'obtenir un minimum de volume stocké dans le dispositif. C'est pourquoi on a retenu les valeurs :

$$l_2 = 3 \text{ m} ; \quad l_3 = 11,5$$

On retient par ailleurs 0,5 comme une valeur plausible du coefficient de contraction dans la formule du déversoir. Donc :

$$V = 5,63 \cdot Q + 0,156 Q^{2/3} + 1,5 \cdot \Omega \quad (\text{avec } V(\text{m}^3), Q(\text{m}^3/\text{s}), \Omega (\text{m}^3)).$$

On en déduit les variations du volume stocké V dans l'ensemble du dispositif, en fonction du débit transité Q. Voir fig. (A).



F) Le régime transitoire

Pour l'étude du régime transitoire, considérons :

Q_e le débit ($m^2 \cdot mm/H$) entrant dans le système

Q_s le débit ($m^2 \cdot mm/H$) sortant du système

V le volume stocké dans le système

On a établi précédemment la courbe : $V = f(Q_s = Q_e)$ relative au régime permanent. Faisons l'hypothèse que pendant le régime transitoire, le volume stocké est lié au débit sortant par la même relation que pour le régime permanent. Cette hypothèse est probablement justifiable pour un régime lentement variable et beaucoup moins pour un régime rapidement variable (par exemple quand on passe de $Q_e = 0$ à $Q_e = C^{te}$ instantanément : il se produit une série de fluctuations périodiques dans le siphon C_4 , qui s'amortissent peu à peu jusqu'à l'obtention du régime permanent). Néanmoins, on va ainsi pouvoir obtenir un ordre de grandeur des temps de réponse du système.

Nous avons donc :

$$\left. \begin{array}{l} Q_e = Q_s + \frac{dV}{dt} \\ V = V(Q_s) \end{array} \right\} \rightarrow Q_e = Q_s + \frac{\partial V}{\partial Q_s} \cdot \frac{dQ_s}{dt} \rightarrow \boxed{dt = \frac{\partial V / \partial Q_s}{Q_e - Q_s} \cdot dQ_s} \quad (22)$$

Temps de réponse à un échelon de Q_e

On considère les conditions suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} t < 0 \rightarrow Q_e = Q_s = 0 \\ t > 0 \rightarrow Q_e = C^{te} \neq 0. \end{array} \right|$$

La mesure directe des pentes de la courbe $V(Q)$ nous permet de tracer la courbe : $\frac{\partial V}{\partial Q_s}$ en fonction de Q_s . (voir fig. A).

Les variations de Q_s suivant la condition initiale vue plus haut se déduisent alors de l'intégration de (22).

$$T = \int_0^T dt = \int_0^{Q_s} \frac{\partial V / \partial Q}{Q_e - Q} \cdot dQ$$

On résout le problème numériquement, en discrétisant l'expression à sommer au pas $\Delta Q = 5 \text{ m}^2 \cdot mm \cdot H^{-1}$:

$$T(n \cdot \Delta Q) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{(\partial V / \partial Q)_{i \cdot \Delta Q}}{Q_e - i \cdot \Delta Q} + \frac{(\partial V / \partial Q)_{(i+1) \cdot \Delta Q}}{Q_e - (i+1) \cdot \Delta Q} \right] \cdot \Delta Q / 2$$

Les courbes $Q_s(T)$ obtenues pour différentes valeurs de Q_e sont reportées sur la figure B.

On constate que pour des valeurs de Q_e comprises entre 20 et 160 $m^2 \cdot mm \cdot H^{-1}$, le débit Q_s sortant du dispositif atteint la valeur Q_e moins 5 après un temps compris entre 30 et 40 secondes.

La valeur $0,9 Q_e$ est atteinte entre 28 et 40 secondes. On retiendra donc que le temps de réponse du dispositif, à un échelon de débit en entrée, est d'environ une demi-minute pour que le débit sortant atteigne une valeur pratiquement égale au débit entrant.

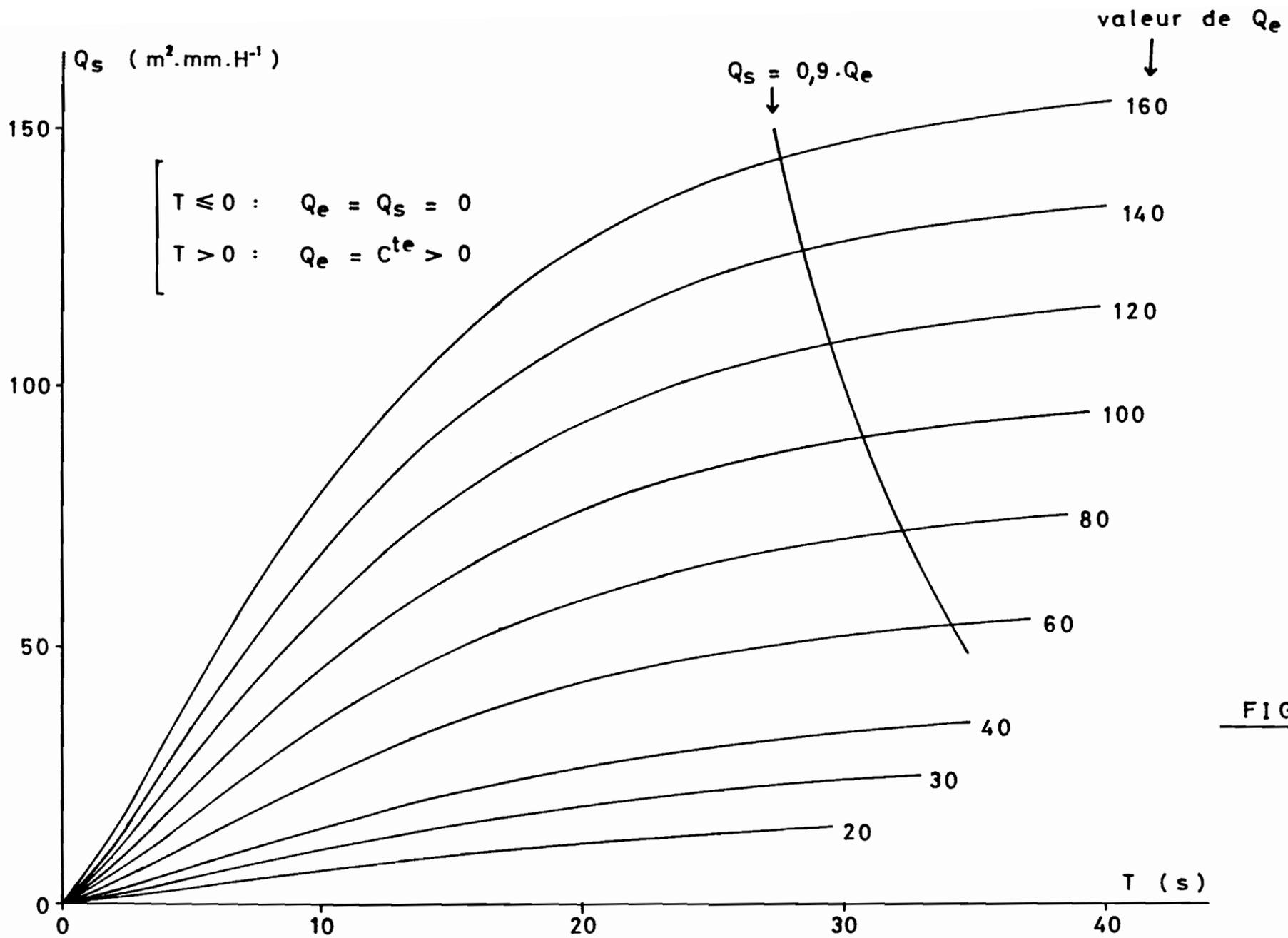


FIGURE B