

# **Essai de caractérisation globale et de modélisation du fonctionnement hydrique d'un petit bassin versant <sup>(1)</sup>**

**GASCUEL-ODOUX\*, J.-P. BLANCHARD\*\*, P. MEROT\***

---

## **SOMMAIRE**

*L'étude des transferts de l'eau à l'échelle du bassin versant est abordée par la recherche d'un modèle hydrologique, ayant pour base le concept de source à surface variable.*

*L'étude des sols et la modélisation montrent que le débit à l'exutoire se décompose en 4 flux : ruissellement et exfiltration, provenant des zones de source à surface variable, écoulement de base et de subsurface.*

## **INTRODUCTION.**

L'étude du fonctionnement hydrique du sol peut être abordée par des approches très diverses et à des échelles variées. Historiquement, les approches analytiques de la circulation de l'eau, au niveau du profil, ont prévalu. Cependant la transposition des résultats à l'échelle du champ se heurte notamment à la variabilité spatiale des paramètres de transfert et à l'absence de prise en compte des transferts latéraux. Ces approches ne permettent donc pas de répondre directement à des « problèmes du champ » tels que les modalités de l'alimentation en eau du ruisseau. Le but de ce travail est donc d'essayer d'aborder l'étude des transferts de l'eau directement à l'échelle du bassin versant élémentaire.

L'approche choisie est la recherche d'un modèle de fonctionnement hydrologique simple et synthétique. Une étude préalable du milieu naturel, et notamment pédologique, conduira à choisir et valoriser une modélisation des principaux flux composant le débit à l'exutoire du bassin versant. L'étude a été limitée à la période hivernale, de décembre à mars, correspondant, à l'aval, à des conditions saturées.

---

(1) Ce travail est issu d'un mémoire de diplôme d'agronomie approfondie effectué au laboratoire de sciences du sol de l'Ecole nationale supérieure d'agronomie de Rennes.

\* Institut national de la recherche agronomique - Sciences du sol Rennes.

\*\* Ecole nationale supérieure agronomique de Rennes - Sciences du sol.

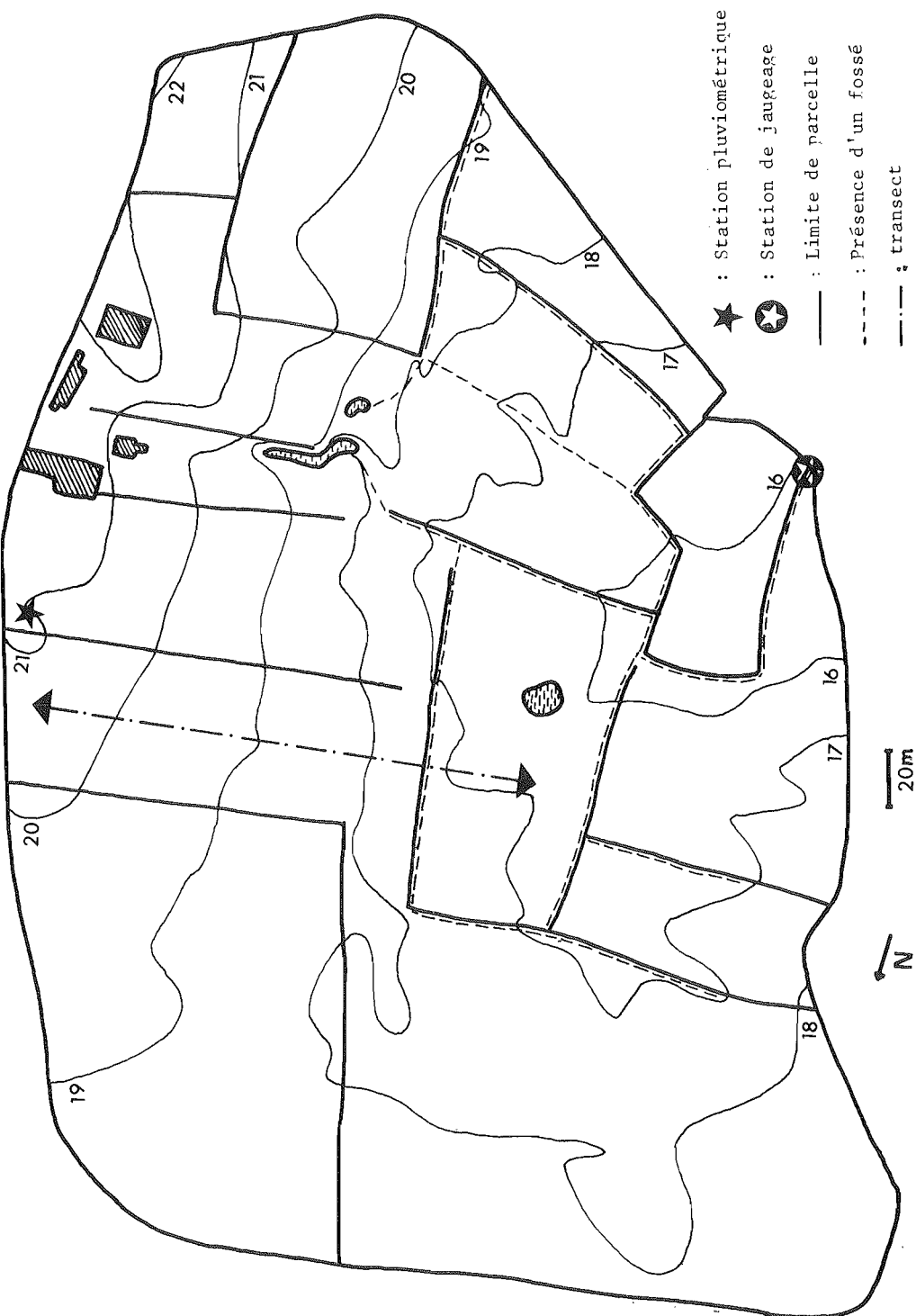


FIGURE I. — *Topographie et équipement du bassin versant.*  
*Topography and equipment of the watershed.*

## I. — PRESENTATION DU BASSIN VERSANT.

### I. - CONTEXTE GENERAL.

Le bassin versant étudié a fait l'objet d'un suivi scientifique depuis trois ans (MEROT *et al.*, 1981). Ce bassin versant élémentaire de dix hectares, en bocage remanié, occupé par des prairies naturelles et artificielles, est caractéristique de la région de Rennes. La pente, légèrement concave, est faible, allant de 4,5 % à l'amont à 2,3 % à l'aval (Fig. I). Le substrat géologique est le schiste briovérien.

Ce bassin est notamment équipé (Fig. I) :

- d'un pluviomètre totalisateur et d'un pluviomètre enregistreur ;
- d'une station de jaugeage, à l'exutoire, comprenant un déversoir à seuil mince triangulaire et un limnigraphe.

Les données climatiques et hydrologiques ont été recueillies de décembre 1980 à mars 1981. Trois approches complémentaires ont été, en outre, suivies :

- Des relevés approximativement hebdomadaires de la superficie des zones saturées, repérées par la présence d'eau libre en surface. Leur extension va jusqu'à 15 % de la superficie totale du bassin versant (Fig. II) ;
- Des mesures de perméabilité des horizons de surface de l'aval du bassin versant, par la méthode du cube vergière et par la méthode hollandaise du trou de tarrière, mettent en évidence une perméabilité verticale, en condition saturée, de l'ordre de 1 m/jour ;
- Une cartographie des horizons pédologiques suivant la méthode expérimentée par BOULET (1979).

### II. - CONTEXTE PEDOLOGIQUE.

Un transect représentatif (Fig. I et III) visualise la distribution des horizons :

● **De 0 à 15 cm, deux horizons** : le premier, de 0 à 6 cm, à structure grumeleuse ; le second, de 6 à 15 cm, à structure massive et à porosité beaucoup plus faible. A l'amont, ces horizons (Ap) sont sains, de couleur brun sombre ; à l'aval, horizons A<sub>pg</sub>, ils sont hydromorphes, de couleur brun grisâtre et présentant des gaines rouille autour des racines.

● **De 15 à 30 cm, trois horizons se succèdent latéralement** : à l'amont, l'horizon A<sub>1</sub> est sain, de couleur brune, à structure polyédrique et à porosité importante intra-agrégats. Les horizons suivants A<sub>1g</sub> et A<sub>1G</sub> présentent une structure massive, une hydromorphie croissante marquée par un éclaircissement de la matrice et par l'apparition de taches ocre de concentration du fer. L'horizon A<sub>1G</sub>, plus hydromorphe, apparaît au dessus de l'horizon A<sub>1g</sub> : à ce niveau, l'hydromorphie est croissante à partir de la surface du sol.

● **De 30 à 60 cm, trois horizons se succèdent latéralement** : à l'amont, l'horizon A<sub>2</sub> est sain, sa structure polyédrique est de fine à très fine, ménageant une porosité inter-agrégats très importante. L'horizon A<sub>2g</sub> qui suit, se différencie par l'apparition de taches claires et ocre. Puis, l'horizon A<sub>2Gcn</sub>, à l'aval, est blanchi et hétérogène, comportant deux domaines de structures, de couleurs et de compaction différentes : l'un, de couleur claire, très poreux, l'autre, de couleur brune à cohésion forte et peu poreux. A ce niveau, l'hydromorphie apparaît croissante à partir de la base du sol.

● **De 60 à 90 cm, trois horizons plus riches en argile (24 % contre 17 % auparavant) se succèdent latéralement**. A l'amont, l'horizon Bt est sain, à structure polyédrique moyenne, présentant des revêtements argileux sur les faces structurales. L'horizon Btg qui suit, zone de fluctuation de la nappe en hiver, présente des taches plus claires d'hydromorphie, peu contrastées. A l'aval enfin, l'horizon Btgd est brun rougeâtre, avec de nombreuses taches claires et ocre d'hydromorphie. Sa structure est polyédrique à

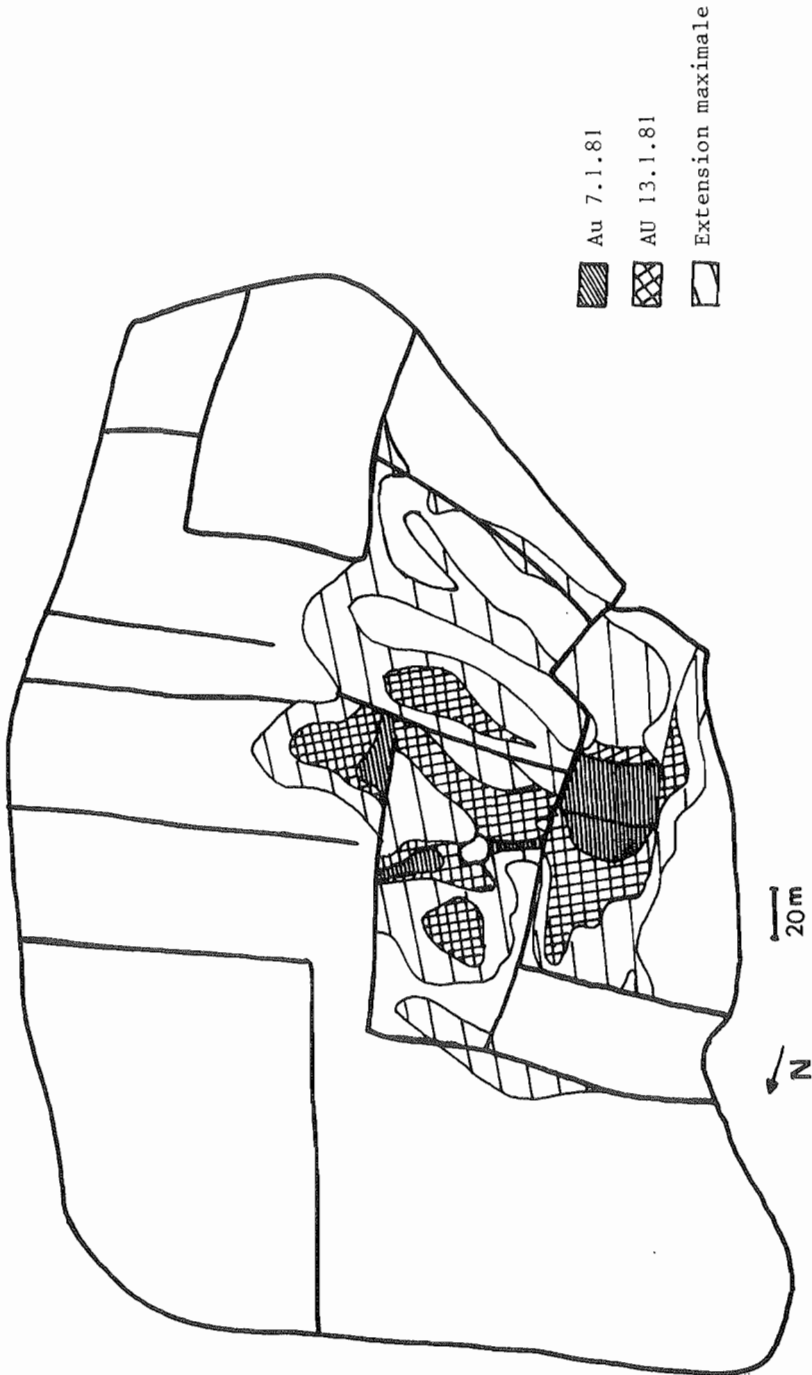


FIGURE II. — *Exemples de l'extension des zones saturées.*  
*Extent of saturated areas.*

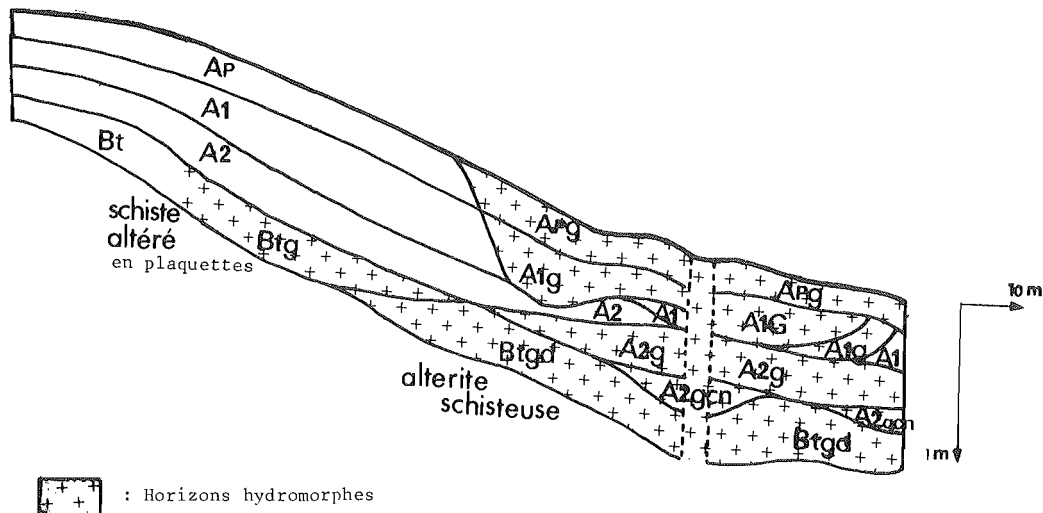


FIGURE III. — *Toposéquence pédologique.*  
*Pedological transect.*

surstructure prismatique ; les pores intra-agrégats sont fins. Des langues de dégradation plus pauvres en argile et plus humides constituent des voies de circulation verticales préférentielles.

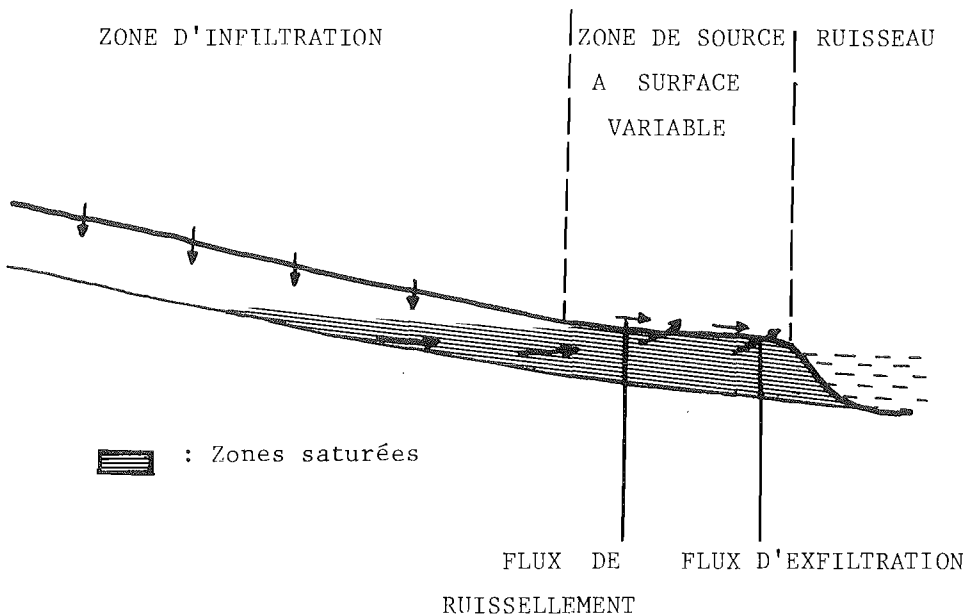
Le schiste briovérien enfin se présente à l'amont sous forme de plaquettes revêtues d'argile, ménageant une porosité grossière entre les graviers. Vers l'aval, on passe à une altérite de schiste limono-argileuse, plus ou moins riche en éléments grossiers, graviers, à structure massive, de porosité très faible et d'épaisseur variant de 20 à 50 cm.

L'étude de cette toposéquence représentative fait donc apparaître des sols contrastés du point de vue de la structure et de l'hydromorphie. Verticalement, on observe une alternance, plus contrastée à l'amont qu'à l'aval, d'horizons de porosité intégragrégat favorable à la circulation de l'eau et d'horizons massifs plus imperméables. Latéralement, on observe deux niveaux dissociés d'hydromorphie, plus étendus que les zones saturées : une hydromorphie superficielle qui gagne en épaisseur vers l'aval, et une hydromorphie profonde plus étendue spatialement et qui remonte en surface à l'aval.

## II. — BIBLIOGRAPHIE.

Un modèle de fonctionnement hydrologique global, adapté au climax du bassin versant, a été recherché en s'inspirant des modèles bibliographiques et en les confrontant aux données acquises sur le bassin versant.

Les différents modèles de circulation de l'eau à l'échelle du bassin versant diffèrent essentiellement par l'interprétation qu'ils donnent de l'écoulement rapide d'une crue (MEROT, 1981). Certains l'attribuent au ruissellement de surface sur des zones ayant atteint leur débit maximum d'infiltration (HORTON, in HILLEL, 1980), d'autres à l'écoulement dans la macroporosité biologique du sol (HURSH, in KIRKBY, 1978), ou à la faveur de discontinuité entre horizons provoquant, par exemple, un écoulement de sub-surface (WHIPKEY, 1978). Enfin, certains modèles basés sur le concept de source à surface variable (DUNNE, 1978) insistent sur l'hétérogénéité de fonctionnement du bassin versant, distinguant deux zones (Fig. IV) :

FIGURE IV. — *Concept de source à surface variable.**Variable source concept.*

— L'amont, où l'eau s'infiltré et alimente l'aval du bassin versant ;

— L'aval, saturé en surface, où, d'une part, l'eau de pluie ruisselle et où, d'autre part, l'eau provenant de l'amont du bassin versant s'exfiltre par gradient de charge. L'aval est donc à l'origine des deux flux qui alimentent le ruisseau : l'un de ruissellement, l'autre d'exfiltration.

Dans ce cas, le débit à l'exutoire est de la forme (HEWLETT et TROENDLE, 1975) :

$$Q_i = S_i \cdot \left( K_s \cdot \frac{dH}{dx} \right) + S_i \cdot P_i \quad (1)$$

où :  $Q_i$  est le débit quotidien à l'exutoire, exprimé en  $m^3 \cdot \text{jour}^{-1}$

$S_i$  est la superficie de la zone saturée au jour  $i$ , exprimée en  $m^2$

$K_s$  est la conductivité hydraulique en condition saturée, dans les zones à l'aval, exprimée en  $m \cdot \text{jour}^{-1}$

$\frac{dH}{dx}$  est le gradient hydraulique au travers de la surface

$P_i$  est la hauteur de pluie tombée au jour  $i$ , exprimée en  $m \cdot \text{jour}^{-1}$

Le terme  $(S_i \cdot P_i)$  représente le ruissellement sur la zone de source. Le terme  $S_i \cdot (K_s \cdot dH/dx)$  représente le drainage du bassin versant par exfiltration.

Contrairement aux modèles de type hortonien, le modèle de source à surface variable est particulièrement adapté aux régions caractérisées par des sols relativement perméables, à végétation dense, à faible pente, et soumises à des précipitations de faible intensité ; le ruissellement y est donc peu important, et la réponse du sol aux

pluies est très différenciée selon la position dans le bassin. Ces caractéristiques conduisent à retenir le modèle de source à surface variable comme base de modélisation, pour notre bassin versant.

La vérification de la relation (1) a été entreprise en tenant compte des éléments suivants :  $P_i$  et  $Q_i$  sont des données connues ;  $K_s \cdot dH/dx$  a été supposé constant ;  $S_i$  a été estimé à partir des relevés hebdomadaires.

### III. — RESULTATS.

#### I. - ESTIMATION DE LA SURFACE DES ZONES SATUREES.

La quantité d'eau libre stockée sur le bassin est liée à l'extension des zones à surface saturée. Celles-ci sont alors considérées comme représentatives de cette eau, et leur extension est contrôlée par deux phénomènes : la vidange et le remplissage.

— **Le débit de vidange**, à l'exutoire, exprimé en l'absence de pluie à partir de la relation (1), devient, en considérant la vitesse ( $K_s \cdot dH/dx$ ) comme une moyenne spatiale constante :

$$[Q_i = S_i \cdot (K_s \cdot dH/dx) \approx k_1 \cdot S_i]$$

D'autre part, en l'absence de pluie, le débit  $Q$ , volume d'eau évacué, est fonction de la hauteur  $h$  de la nappe, de la surface saturée  $S$  et de la porosité de drainage  $\mu$ .

$$\left[ Q = - \frac{dV}{dt} = \left( -h \frac{dS}{dt} - S \frac{dh}{dt} \right) \cdot \mu \right]$$

D'où 
$$Q = k_1 \cdot S = \left( -h \frac{dS}{dt} - S \frac{dh}{dt} \right) \cdot \mu$$

D'où 
$$k_1 \cdot dt = -\mu h \frac{dS}{S} - \mu dh \approx -\mu h \frac{dS}{S}$$

D'où 
$$\frac{dS}{S} = -\varepsilon dt$$

Soit la relation (2) : 
$$S_i \approx (1 - \varepsilon) \cdot S_{i-1}$$
 où  $\varepsilon$  est une constante petite où  $S_i$  et  $S_{i-1}$  sont les superficies au jour  $i$  et  $i-1$

On notera cependant les approximations successives faites et notamment celle de la négligence de la variation  $dh$  de la hauteur de la nappe, en raison des faibles pentes.

— **Le débit de remplissage** est exprimé en présence de pluie. L'hypothèse faite est qu'une hauteur quotidienne de pluie  $P_i$  induit une élévation du niveau de la nappe  $\Delta h$ , correspondant à une extension proportionnelle  $\Delta l$  de la zone saturée en surface (Fig. V).

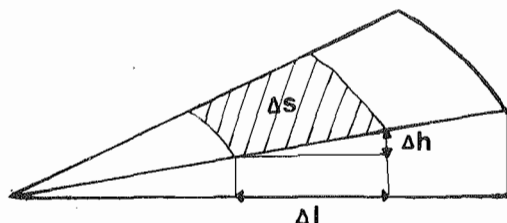


FIGURE V. — Hypothèse de remplissage du bassin versant.

*Hypothesis of filling in, on the watershed.*

D'une part  $\Delta h = k_3 \cdot P_i$

D'autre part  $\Delta h = k_4 \cdot \Delta l = k_2 \cdot \Delta S^{1/2}$

D'où  $\Delta S^{1/2} = A \cdot P_i$  relation (3)

$k_1, k_2, k_3$  et  $k_4$  sont des constantes.

En prenant en compte les termes de remplissage et de vidange (relations 2 et 3), on estimera la superficie des zones saturées ainsi :

$$S_i^{1/2} = A \cdot P_{i-1} + (1-\epsilon) \cdot S_{i-1}^{1/2}$$

$$\sqrt{S_i} = A \cdot P_{i-1} + (1-\epsilon/2) \cdot \sqrt{S_{i-1}}$$

$$\sqrt{S_i} = A \cdot P_{i-1} + B \cdot \sqrt{S_{i-1}}$$

Par ajustement sur une période de trois mois, on trouve  $A = 3$  et  $B = 0,95$ , avec un coefficient de corrélation de 0,87 entre les valeurs réelles et les valeurs estimées (Fig. VI). L'utilisation de cette estimation n'est apparemment possible, du

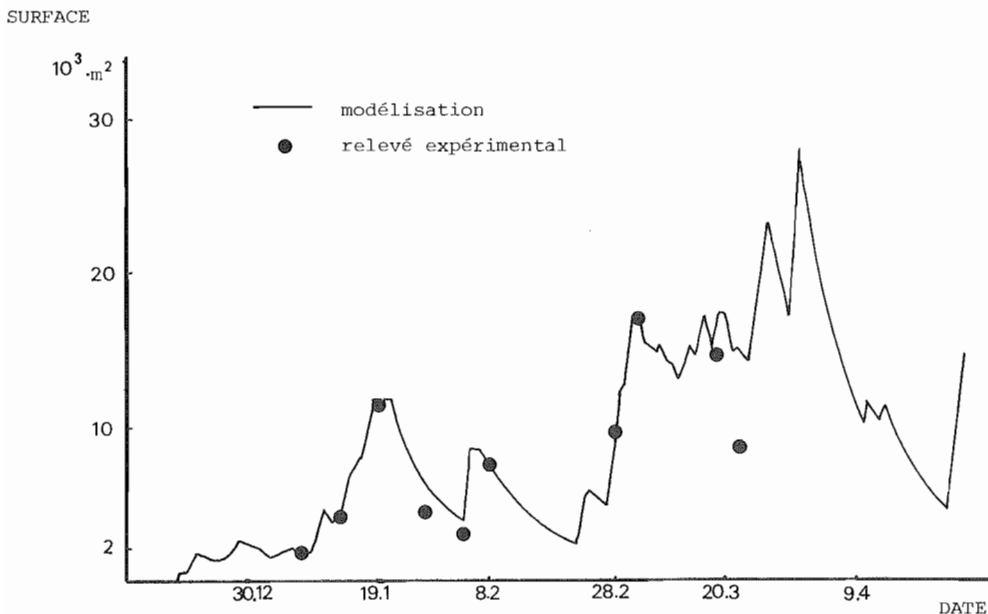


FIGURE VI. — Modélisation de la superficie des zones saturées pour l'hiver 80-81.  
*Superficy modelling of saturated areas, in winter 80-81.*

fait de l'itération, que si l'on connaît une valeur initiale de la superficie. Cependant, en partant d'une valeur approximative, on aboutira rapidement à une évaluation correcte de cette superficie, le calcul itératif adopté impliquant un amortissement progressif de l'erreur. La vérification en a été faite en prenant une surface initiale nulle après une période importante de ressuyage des sols.



II. - ESTIMATION DU DEBIT QUOTIDIEN A L'EXUTOIRE.

Une estimation du débit quotidien a été recherchée, à partir de la relation (1), pour janvier 1981 :

- $(S_i . P_i)$  a été évalué à partir de l'estimation de la superficie des zones saturées (cf. § III - Ψ 1) et de la hauteur quotidienne des précipitations.
- Pour mettre en évidence le terme d'exfiltration, le graphe  $(Q_i - S_i . P_i) = f(S_i)$  a été construit (Fig. VII) et montre que l'on a une relation plus complexe que celle proposée par les modèles de sources à surface variable :

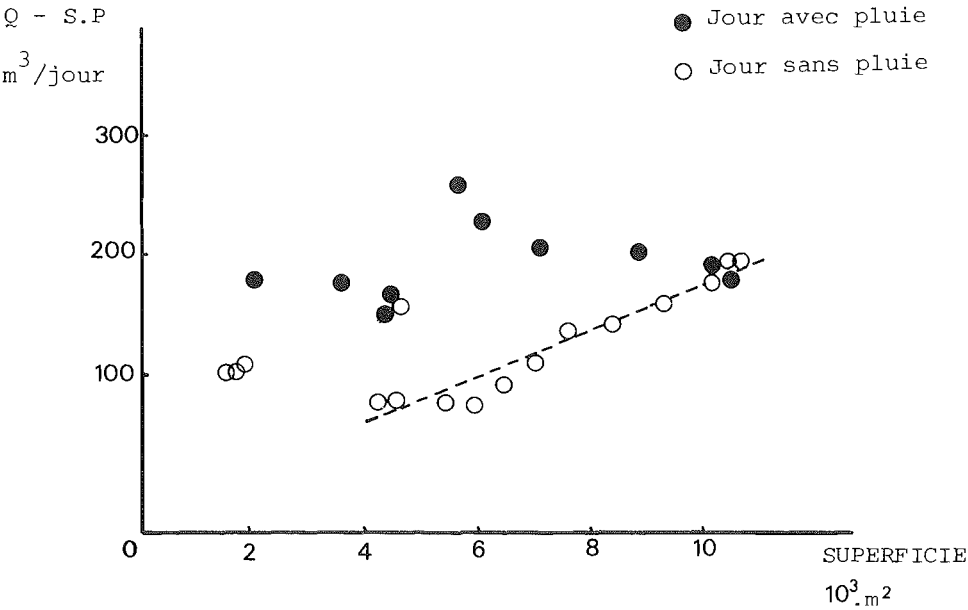


FIGURE VII. — Graphe du débit quotidien, moins le ruissellement, en fonction de la superficie des zones saturées, pour janvier 81.

Graphic of daily outflow, except overlandflow, function of superficie of saturated areas, in January 1981.

- En l'absence de pluie, le débit quotidien apparaît sensiblement constant à 100 m³/jour pour des superficies saturées inférieures à 6.000 m² puis en relation linéaire avec ces surfaces au-delà. Une approximation a été faite en prenant :

$$Q_i - S_i P_i = \alpha S_i + \beta$$

- En période de pluie, le débit quotidien est, de plus, directement influencé par la hauteur des précipitations.

L'hypothèse suivante a donc été faite :

$$Q_i = (K_s . dH/dx) . S_i + S_i . P_i + \gamma P_i + \beta$$

Soit

$$Q_i = \alpha . S_i + S_i . P_i + \gamma P_i + \beta$$

où  $Q_i$  est le débit quotidien, exprimé en  $m^3 . J^{-1}$   
 $S_i$  est la surface des zones saturées au jour  $i$ , exprimée en  $m^2$   
 $P_i$  est la hauteur des précipitations quotidiennes, exprimée en  $m . J^{-1}$

$\alpha$  a la dimension d'une perméabilité ( $L \cdot T^{-1}$ )  
 $\beta$  a la dimension d'un débit ( $L^3 \cdot T^{-1}$ )  
 $\gamma$  a la dimension d'une surface ( $L^2$ )

Les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  ont été trouvés par régression linéaire multiple, pour janvier 81, avec un coefficient de corrélation de 0,85 entre les valeurs mesurées et les valeurs réelles du débit (Fig. VIII).

La modélisation du débit est alors :

$$Q_i = 0.009 S_i + 86 + 12330 P_i + S_i P_i$$

Ce modèle a également été appliqué sur des données de mars 1979.

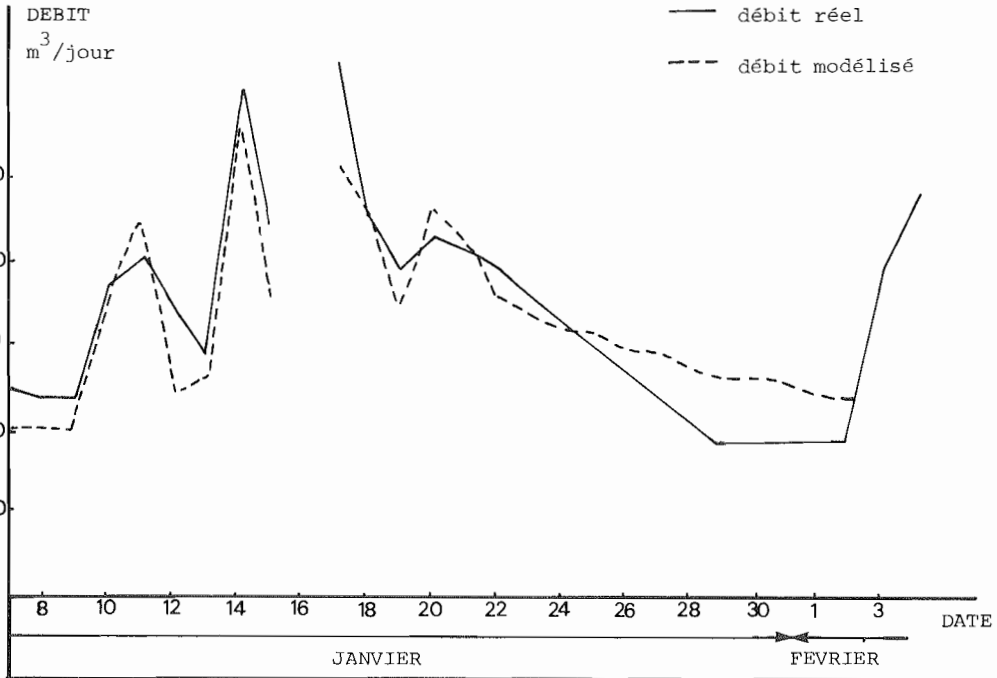


FIGURE VIII. — Modélisation du débit, en janvier 1981.

*Daily outflow modelling, in January 1981.*

#### IV. — DISCUSSION.

##### I. - LIMITES INHERENTES AU MODELE.

Une telle approche synthétique de modélisation des différents éléments dynamiques de la formation d'une crue reste approximative. En effet, ont été négligés :

- L'importance du temps choisi dans l'itération du modèle. Le pas de temps quotidien ne permet pas de se placer à l'échelle de temps de l'événement pluvieux et ne peut prendre en compte les temps de transfert de l'eau. Il n'est cependant pas possible de réduire ce temps ici, sous peine d'erreur, la pluie et le débit n'étant pas enregistrés simultanément sur le même appareil.
- L'état hydrique initial avant la crue n'est pris en compte que par la superficie des zones saturées. Il est évident qu'on a pu considérer  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  comme des constantes, parce qu'on a testé ce modèle sur une courte période où l'état hydrique du bassin ne variait que relativement peu.

## II. - INTERPRETATION.

La modélisation du débit (tableau 1) a pris en compte quatre termes (relation 5) : deux,  $S_i \cdot P_i$  et  $\gamma P_i$ , constituant la réponse rapide du bassin versant à la crue, les deux autres,  $\alpha S_i$  et  $\beta$ , représentant le débit de base. Ces termes s'interprètent à la fois à partir de leur propre signification physique et à partir de la caractérisation pédologique du bassin versant.

DATE	$S_i \cdot P_i$		$\alpha \cdot S_i$		$\gamma \cdot P_i$		$\beta$		$Q_i$ modélisé m <sup>3</sup>	$Q_i$ réel m <sup>3</sup>
	m <sup>3</sup>	% Q	m <sup>3</sup>	% Q	m <sup>3</sup>	% Q	m <sup>3</sup>	% Q		
7.01.81	0	0	18	18	0	0	82	82	100	123
8.01.81	0	0	17	17	0	0	82	82	99	118
9.01.81	0	0	15	15	0	0	82	82	97	117
10.01.81	10	6	19	11	57	34	82	49	168	187
11.01.81	25	11	33	15	83	37	82	37	223	205
12.01.81	0	0	41	33	0	0	82	67	123	170
13.01.81	3	2	39	29	9	7	82	62	133	143
14.01.81	48	17	51	18	104	36	82	29	285	309
15.01.81	13	7	63	35	22	12	82	45	180	221
17.01.81	43	16	67	25	72	27	82	31	264	320
18.01.81	29	13	79	34	41	18	82	35	231	229
19.01.81	0	0	95	54	0	0	82	46	177	194
20.01.81	28	12	94	40	33	14	82	35	237	216
21.01.81	18	8	92	43	22	10	82	38	214	210
22.01.81	3	2	95	52	4	2	82	45	184	198
23.01.81	0	0	92	53	0	0	82	47	174	183
24.01.81	1	1	84	50	1	1	82	49	167	166
25.01.81	2	1	76	47	2	1	82	51	162	182
26.01.81	2	1	69	44	2	1	82	53	155	137
27.01.81	2	1	63	41	4	3	82	54	151	123
28.01.81	1	1	58	41	2	1	82	57	143	109
29.01.81	0	0	54	40	0	0	82	60	136	92
30.01.81	2	1	49	35	5	4	82	59	138	95
31.01.81	1	1	45	34	4	3	82	62	132	95
1.02.81	0	0	42	34	1	1	82	66	125	95
2.02.81	1	1	38	31	2	2	82	67	123	95
3.02.81	42	15	40	14	118	42	82	29	282	204
4.02.81	24	11	55	26	49	23	82	39	210	250

TABLEAU 1. — Estimation des différents flux composant le débit quotidien et modélisés par la relation (5) :

$$Q_i = S_i \cdot P_i + \alpha S_i + \gamma P_i + \beta.$$

Estimation of different flows, in the daily outflow and modelling by the relation (5):

$$Q_i = S_i \cdot P_i + \alpha S_i + \gamma P_i + \beta.$$

— Le terme  $S_i \cdot P_i$  prend en compte le ruissellement sur les zones saturées de l'aval. Ce flux ne représente qu'une faible part du débit lors d'une crue, environ 10 %.

— Le terme  $\gamma P_i$ , terme nouveau par rapport au concept de source à surface variable, indique une réponse rapide et spécifique du sol aux précipitations. Ce flux, important, qui représente jusqu'à 40 % du débit lors d'une crue, peut s'interpréter physiquement soit en terme de ruissellement, soit en terme d'écoulement de subsurface. Cette dernière hypothèse semble la plus probable, compte tenu (cf. § 1) d'une faible susceptibilité au ruissellement des sols et de la présence d'un niveau superficiel d'hydromorphie (0 - 30 cm), plus étendu que les zones

saturées, gagnant vers l'amont, où les horizons de surface sont de structure contrastée. Cette participation rapide de l'eau des horizons de surface, qui a été confirmée par traçage isotopique (MEROT et al., 1981) serait alors due à un effet de chasse, en début de crue. La présence des fossés hérités du bocage favoriserait également la mobilisation rapide de cette eau.

- Les termes  $\alpha Si$  et  $\beta$  représentent l'écoulement de base et constituent 50 à 70 % du débit lors d'une crue. L'origine de ces deux flux est la décharge de la nappe qui sature le sol à l'aval et remonte dans les horizons Btg très en amont du bassin versant, où elle fluctue en hiver (cf. § 1). Cette décharge se ferait, en partie, par exfiltration, comme l'exprime le terme  $\alpha Si$  ; celui-ci représente la réponse différée du sol à la crue, prend en compte l'état hydrique du bassin versant et constitue jusqu'à 30 % du débit en période de crue. La présence d'un flux  $\beta$  souligne qu'une part importante de l'écoulement de base, constant en période hivernale, arrive à l'exutoire sans dépendre des zones de source.

## CONCLUSION.

L'approche de modélisation empirique choisie met en évidence la dynamique des processus hydrologiques à l'échelle de ce bassin versant élémentaire, distinguant les principaux flux qui constituent le débit à l'exutoire. Deux flux apparaissent rapidement lors d'une crue : le ruissellement sur les zones saturées et l'écoulement de subsurface. Deux autres flux, qui constituent l'écoulement de base, proviennent de la décharge de la nappe se faisant en partie par exfiltration.

Le choix du concept de source à surface variable souligne l'effet dynamique des zones saturées de l'aval des bassins versants sur l'hydrologie : ces zones participent, en effet, de façon importante au drainage du bassin. Cependant, ce concept néglige la réponse spécifique de sols très différenciés sur ce bassin versant qui, par le jeu de différents niveaux d'hydromorphies et de compacités, induisent un écoulement de subsurface important.

On peut enfin souligner l'apport de l'étude des caractéristiques pédologiques telles que la structure et l'hydromorphie dans l'interprétation et l'utilisation d'un modèle empirique simple.

SUMMARY

GLOBAL CHARACTERISATION AND MODELING OF WATER PROCESS ON AN ELEMENTARY WATERSHED.

*Water transfert study, in field, is attempted to be account for in terms of a global model of hydrologic process, on an elementary watershed near Rennes (MEROT, 1981). A lanscape study (figure I) and particularly a study of structure, porosity and hydromorphy soil characteristics (figure III) lend us to consider the variable source concept (KIRBY, 1978) as a basis for modelling. According to this former concept, the outflow may be separated into two parts: the overland flow and the exfiltration on saturated areas (figure IV).*

*The superficie of saturated areas, on the soil surface, is daily estimated (figure VI) from Weekly measurements (figure II) and have allowed to calculate the contribution of both of those terms, and to elaborate a modelling of daily outflow in winter, compared to experimental values (figure VII).*

*Three major conclusions are drawn from the soil study and the outflow modelling during winter: (1) 20 to 50 % of the resulting outflow comes from the variable source areas, by exfiltration and overland flow, according to the concept; (2) in addition to that, a baseflow is approximatively constant during the winter period; (3) a subsurface flow is also shown, which explains a short lag of the wathershed response to rainfall, perhaps induced by different hydromorphy and structure of horizons.*

Bibliographie

- BOULET R. (1979). — Méthode d'analyse et de représentation des couvertures pédologiques des bassins versants. ECEREX, bulletin de liaison n° 1 du groupe de travail « écosystèmes forestiers guyannais, étude et mise en valeur », p. 11-19.
- BRANCHARD J.-P., GASCUEL-ODOUX C. (1981). — Recherche sur les transferts d'eau dans un petit bassin versant (Nouvoitou, Ille-et-Vilaine) : approche par l'étude morphologique et cartographique des horizons pédologiques, essai de modélisation du fonctionnement hydrique. SDS 245, 89 p.
- DUNNE T. (1978). — Field studies of hillslope flow processes. In Hillslope hydrology - Kirkby - John Wiley and sons, p. 227-293.
- HEWLETT J.-D., TROENDLE C.-A. (1975). — Non point and diffused water sources: a variable source area problem. In Watershed management - Utah state university, 45 p.
- HILLEL D. (1980). — Fondamental of soil physics - Academic press, 413 p.
- MEROT et al. (1981). — Fonctionnement hydrodynamique d'un bassin versant élémentaire en Bretagne. Contrat avec le ministère de l'environnement n° 77/87, 167 p.
- MEROT et al. (1981). — Analyse d'une crue à l'aide du traçage naturel par l'oxygène 18 mesuré dans les pluies, le sol, le ruisseau. Catena, vol. 8, n° 1, p. 69-81.
- WHIPKEY R.-Z., KIRKBY M.-J. (1978). — Flow within soil. In Hillslope hydrology. Kirkby, John Wiley and sons, Chichester, p. 121-144.

