

Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale

G. GIRARD,
Directeur de Recherches de l'O.R.S.T.O.M.
G. MORIN,
Professeur à l'Institut National de Recherche Scientifique
du Québec (I.N.R.S. — Eau).
R. CHARBONNEAU,
Professeur à l'Institut National de Recherche Scientifique
du Québec (I.N.R.S. — Eau).

RÉSUMÉ

Les auteurs décrivent un modèle de transformation précipitations-débits basé sur une division du bassin en carrés définis par leur taille et leurs caractéristiques physiographiques. La reproduction des débits est obtenue en effectuant le bilan de chaque carreau à chaque pas de temps. Les fonctions de production et de transfert sont nettement séparées. Le modèle est caractérisé par une grande souplesse de mise en place et d'utilisation (entre autres, il est très facile d'introduire des modifications morphologiques dues à l'homme), et par un déterminisme très poussé, le réglage paramétrique étant réduit à très peu de choses et pouvant être effectué sur un plan régional.

ABSTRACT

The authors describe a precipitation-runoff model basically structured by sharing the catchment into squares defined by their size and physiographic characteristics. Simulating discharges is obtained by doing the water balance on each square for every time interval. Production and routing functions are plainly distinguished. The model is characterized by a great flexibility in building and using (among others, it is very easy to introduce man made morphological modifications), and by a very high degree of determinism; parametrical fitting is very reduced and can be done in a regional field.

Au Congrès de Varsovie sur les modèles mathématiques, stochastiques et déterministes, appliqués à l'hydrologie, un nombre important de participants considéraient que le nombre de ces modèles déjà élaborés était suffisant et que le problème des années futures serait plutôt de mettre en œuvre une intercomparaison afin de n'en retenir que les meilleurs. Ce choix serait basé sur des critères permettant de faire ressortir les avantages et inconvénients de chaque modèle, notamment en ce qui concerne leurs possibilités de transposition d'un bassin à l'autre.

Ce point de vue nous semble personnellement un peu sommaire et nous pensons qu'il n'est pas encore justifié d'interrompre la recherche en ce domaine. C'est pourquoi nous présentons ici un modèle déterministe extrêmement souple, prenant en compte les multiples caractéristiques physiques du bassin avec leurs variations dans l'espace et même dans le temps. Ces caractéristiques ont une influence sur les opérations de transformation et les conditions d'écoulement, mais aussi sur les valeurs des données météorologiques qui constituent la matière première du modèle; ce dernier point peut permettre de préciser efficacement les interpolations inévitables pour ces données d'entrée.

Du fait même de sa conception, le modèle permet de suivre, aussi bien dans l'espace que dans le temps, la formation et l'évolution des écoulements naturels. Il se prête par ailleurs très facilement à l'introduction de toute modification artificielle de l'écoulement dans les cours d'eau :

- barrage régularisateur de débit,
- barrage écrêteur de crue,
- barrage de dérivation vers une autre partie du bassin ou à l'extérieur.

Il peut accepter toute modification du schéma de production des apports, sans, qu'il soit nécessaire pour cela de remettre en question son organisation générale, ni de procéder à nouveau à un réglage complet. Cela doit se traduire par une économie substantielle en temps de calcul, par rapport à d'autres types de modèles. Bien entendu, il ne saurait prétendre, comme tout autre modèle, fournir des résultats d'une précision supérieure à celle que lui permet l'état des données d'entrée, notamment des données météorologiques.

L'idée de ce type de modèle est née de l'existence d'une banque de données physiographiques réalisée par le Québec et de la collaboration du CEQUEAU (ancien nom de l'I.N.R.S.-Eau) et de l'O.R.S.T.O.M. M. SLIVITZKY, Directeur de cet organisme, avait demandé à un groupe de chercheurs franco-québécois d'étudier les possibilités d'utilisation d'une telle banque dans le domaine des modèles de transformation précipitations-débits.

1. CONCEPTION DU MODÈLE.

Un modèle mathématique destiné à simuler la transformation des précipitations en débits fait appel à deux notions très différentes : l'une se rapporte à l'organisation spatio-temporelle des calculs, on l'appellera «structure», l'autre comporte l'ensemble des procédés de calculs relatifs aux opérations de transformation sur des espaces élémentaires et de transferts entre ces espaces élémentaires, on les désignera par l'expression «algorithmes de transformation». Dans le présent exposé, comme il semble logique sur ce type de modèle, on donnera le pas à la notion de structure.

1.1. STRUCTURE.

1.1.1. *Premier découpage. Caractéristiques des carreaux entiers.*

Du point de vue purement conceptuel, le mode de découpage du bassin est arbitraire ; il suffirait d'établir un ensemble de surfaces élémentaires de dimensions à peu près semblables. Pour des raisons pratiques, ce découpage se fera toujours suivant des surfaces carrées : facilités d'adressage, systématisation d'une banque de données.

Le bassin versant d'un cours d'eau, que l'on prendra soin de limiter nettement à l'aval de la zone susceptible d'être aménagée hydrauliquement, est décomposé en un très grand nombre de petits carrés (en pratique 100 à 1000) de mêmes dimensions, dont la direction des côtés (orientée généralement N-S ou E-O) peut être parallèle à celle des obstacles ou barrières naturelles (mer, chaîne de montagne).

De ce quadrillage résulte la formation de NCE carrés dont au moins une partie de chacun d'eux est comprise dans le bassin versant. Par divers procédés, on peut définir les caractéristiques physiques propres de ces carreaux dits «entiers» :

- Altitude moyenne,
- Pente moyenne,
- Orientation géographique,
- Pourcentage de couvert forestier,
- Indice de couverture végétale,
- Pourcentage de lac,
- Pourcentage de marais,
- Pourcentage de terrain sédimentaire, granitique, etc.
- Indice de la nature pédologique des sols,

et bien d'autres caractéristiques physiques si elles sont nécessaires à la compréhension hydrologique des processus secondaires, tels que la reprise par évaporation dans la zone aérée du sol.

Dans la mise en œuvre du modèle, on admet comme hypothèse de base qu'il est possible, pour chaque caractère physique, de définir une valeur moyenne sur chaque carreau entier : cette valeur moyenne se conserve dans le fractionnement du carreau. L'expérience vérifie que cette hypothèse simplificatrice n'introduit aucune erreur décelable dans les résultats.

1.1.2. *Second découpage et drainage.*

Si on ne recherche que l'écoulement à l'issu d'un bassin comportant de nombreux carreaux, il suffit de définir pour chaque carreau le carreau vers lequel ce dernier se draine.

Si on veut, par contre, connaître en chaque carreau le débit qui transite, et ceci avec la meilleure précision, on doit procéder à une subdivision de ces carreaux entiers, basée sur le tracé des sous-bassins des cours d'eau d'ordre inférieur et sur le tracé des sous-bassins à l'issu desquels on désire faire sortir les débits.

Chaque carreau du premier quadrillage, dit «carreau entier», est décomposé, par les lignes de partage des eaux des sous-bassins, en un maximum de quatre parties dont chacune est appelée «carreau partiel». La seule caractéristique physique liée à ce carreau partiel est sa superficie exprimée en pourcentage du carreau entier.

Ce second découpage permet de calculer exactement la superficie du bassin versant amont à l'issu d'un carreau, ainsi que toute autre caractéristique physique moyenne liée à ce bassin, si au préalable le sens d'écoulement de carreau à carreau a été défini. Ceci est obtenu en indiquant pour tout carreau partiel de chaque carreau entier, le carreau partiel du carreau entier voisin, ou ce carreau entier lui-même alors considéré comme carreau partiel, dans lequel il se draine. Ceci revient à définir systématiquement le carreau partiel qui reçoit le drainage d'un carreau partiel situé dans le carreau entier étudié.

La définition du sens de drainage de chaque carreau partiel est la pièce maîtresse de ce modèle de simulation.

On notera qu'un carreau partiel CP peut recevoir de l'eau de plusieurs carreaux partiels situés en amont, et obligatoirement extérieurs au carreau entier qui contient CP. Par contre CP ne peut se drainer que dans un seul carreau partiel extérieur au carreau entier qui le contient.

La figure 1 montre un tel exemple de décomposition d'un bassin en carreaux entiers et partiels. Les flèches indiquent les sens de drainage qui ont été retenus au vu des conditions topographiques.

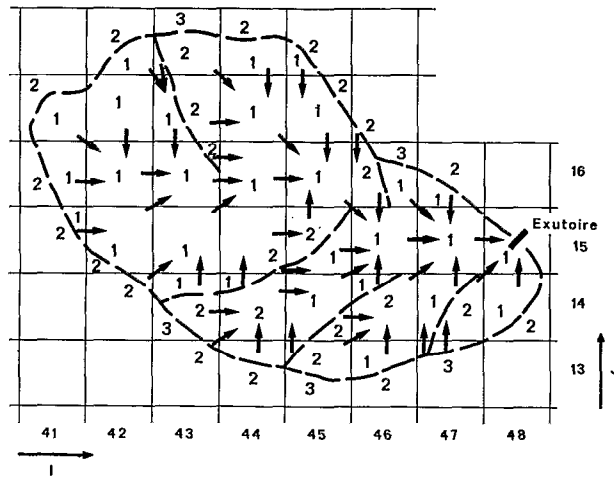


Fig. 1.

1.2. ALGORITHMES DE TRANSFORMATION.

1.2.1. Fonctions de production.

Les principales sources d'alimentation en eau atmosphérique du bassin sont les pluies et la neige. L'eau provenant des pluies est en principe directement disponible pour les opérations de transformation conduisant aux débits. Pour la neige, il est nécessaire de définir en outre un modèle de fonte.

Quelle que soit l'origine de l'eau atmosphérique entrant ainsi dans un carreau, elle subira, avant sa mise à disposition pour l'écoulement, un certain nombre de pertes et différentes orientations qui auront une influence directe sur la formation de l'onde d'écoulement. La figure 2 schématise un tel ensemble de transformations qui peut être considéré comme la fonction de production.

Les paramètres de cette fonction seront déduits des caractéristiques physiographiques par des lois simples, représentatives du phénomène physique. L'expérience acquise par l'étude des bassins versants représentatifs et expérimentaux facilite grandement, pour une telle fonction, une schématisation répondant à tous les cas possibles et permettant une évaluation expérimentale de ces lois.

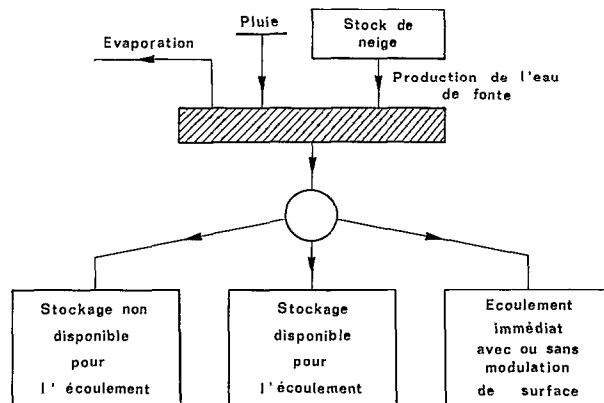


Fig. 2. — Fonction de production.

1.2.2. Fonctions de stockage.

L'eau mise à disposition par la fonction de production est rarement libérée directement de son carreau d'origine. Elle est dirigée vers différents niveaux de stockage formant un ensemble plus ou moins complexe, suivant le degré de complication physique du bassin et suivant le degré d'analyse auquel on souhaite parvenir.

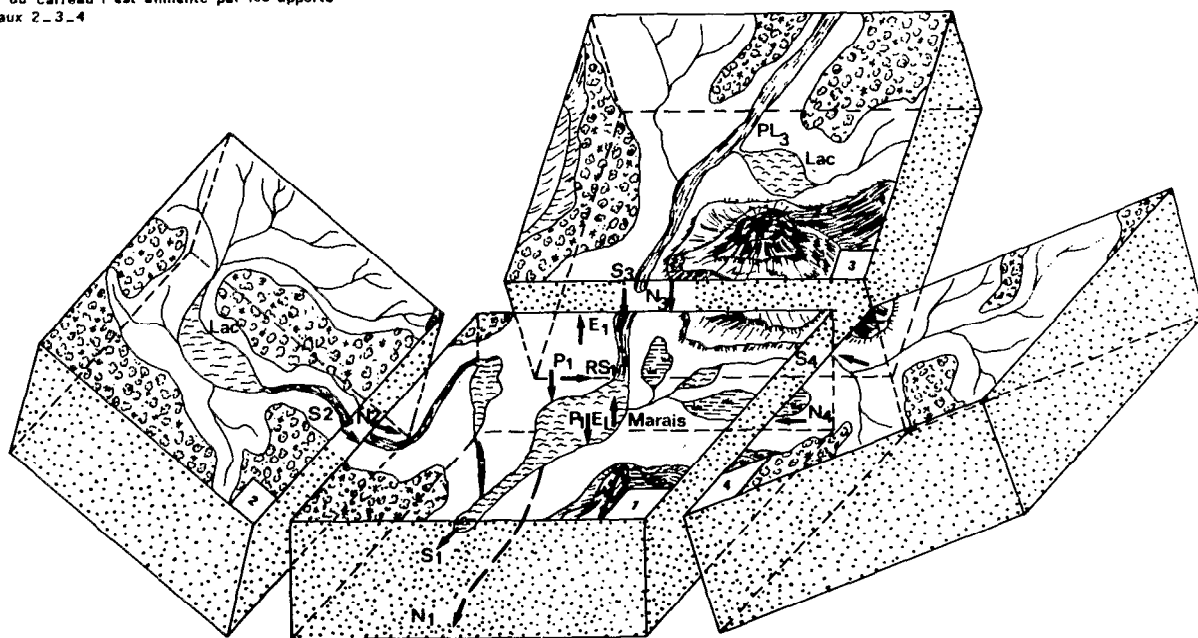
Dans ce type de modèle, les fonctions de stockage sont étroitement liées aux fonctions de production d'une part et aux fonctions de transfert d'autre part. Dans chacun de ces cas, elles jouent un rôle et ont un comportement totalement différent. Dans le premier elles se rapportent aux nappes souterraines, à la réserve de la zone aérée, à la rétention de surface, dans le second, elles rendent compte de l'influence des lacs ou autres réservoirs superficiels, ainsi que de celle du réseau hydrographique.

1.2.3. Fonctions de transfert.

Elles rendent compte des transformations subies, dans le carreau partiel, spécialement par suite de l'effet d'amortissement et de réduction dû aux lacs, par les apports provenant des carreaux amonts et par les apports propres du carreau partiel.

La figure 3 montre comment sont effectués les transferts.

Le réseau du carreau 1 est alimenté par les apports des carreaux 2-3-4



Si à la fin d'une période de temps ΔT , "SA" sont les volumes stockés dans le réseau de chacun des carreaux il s'écoule de chacun des carreaux $SA \times XKT$ (XKT coefficient de transfert) vers le carreau aval il reste dans ce carreau $SA \times (1 - XKT)$ mais s'ajoute dans la période suivante

- a) les eaux provenant des carreaux Amont immédiat
- b) les eaux provenant de l'écoulement sur le sol du propre carreau
- c) les eaux provenant du bilan sur les lacs

Eau de surface et eau souterraine

$$SA_1 = S_1 + N_1$$

$$SA_1 = (SA_1 + 1 - XKT_1) \cdot \left(\sum_{j=2}^{j-4} SA_j \cdot XKT_j \right) + \left(XKS_1 \cdot 0 \Gamma (HS - HO) + XKN_1 \cdot HS \right) \cdot (1 - PL_1) + PL_1 \cdot (P - E)$$

Fig. 3. — Schéma du mode de transfert.

2. ORDONNANCEMENT DE LA STRUCTURE DANS LE MODÈLE.

Le problème consiste d'abord à décrire, sous une forme commode pour leur introduction dans le modèle, le schéma des carreaux entiers et partiels, et les caractéristiques physiographiques retenues pour les carreaux entiers. Le système qui a été conçu permet de travailler à partir de toute banque de donnée existante utilisant un système de référence homogène : n'importe quel bassin contenu dans le champ géographique couvert par la banque peut alors être traité sans qu'il soit nécessaire d'établir un nouveau fichier. Il permet également de définir implicitement l'ordre du drainage.

2.1. Présentation des caractéristiques.

Le but est obtenu en présentant sur une seule carte les données relatives à chaque carreau entier :

- le numéro du carreau entier,
- le nombre de carreaux partiels qu'il contient,
- pour ces carreaux partiels, dont le nombre est limité à 4, sont données les superficies partielles de chacun d'eux exprimées en fraction de la surface du carreau entier et les numéros des carreaux partiels vers lesquels ils se drainent,
- les caractéristiques physiques des carreaux entiers.

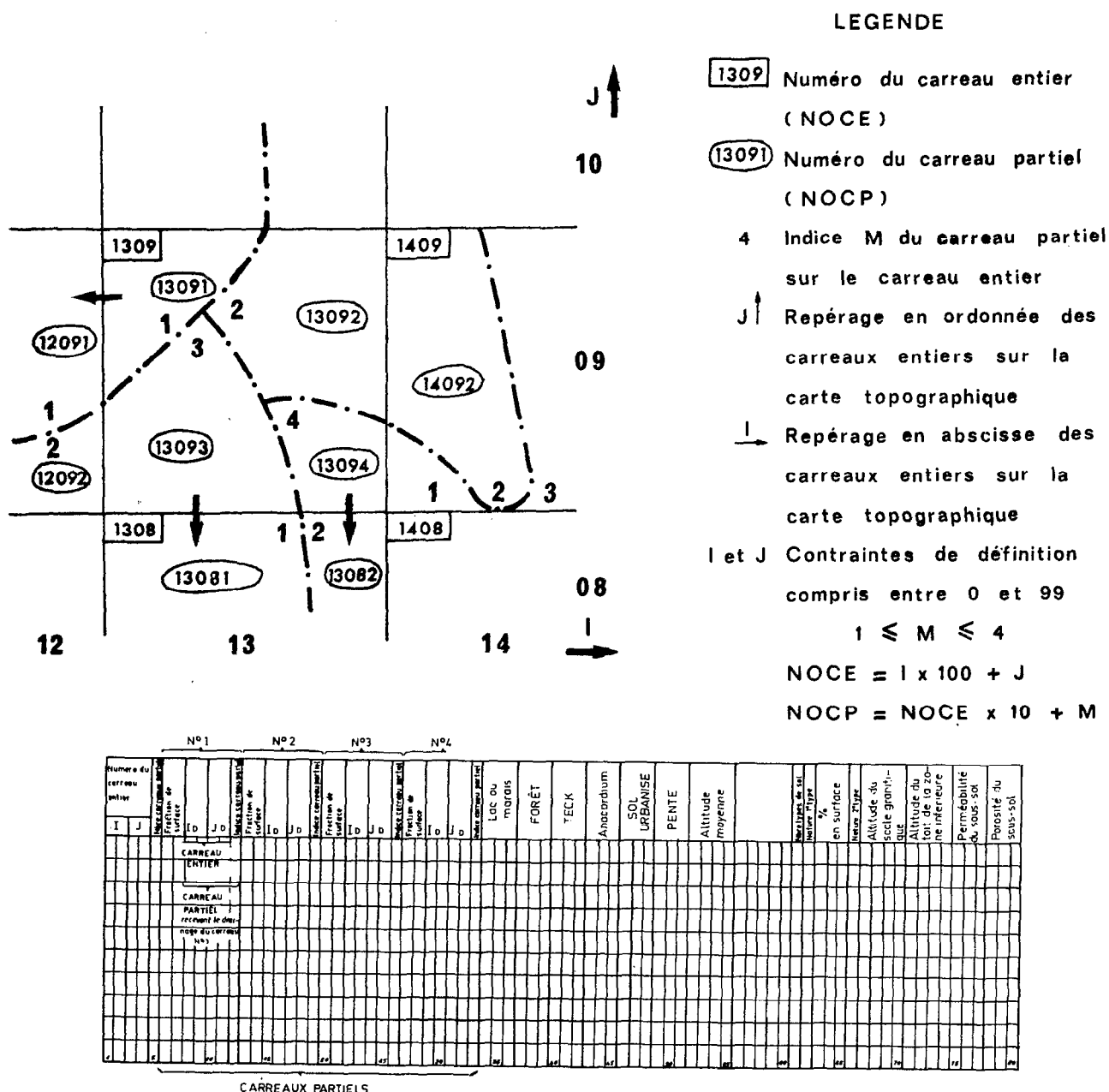


Fig. 4. — Définition du repérage des carreaux sur carte topographique.

Les carreaux entiers sont numérotés d'après les abscisses et ordonnées qui lui correspondent dans un système de référence général, dans le cas d'une banque, ou établi spécialement, dans le cas d'une étude isolée. Le procédé apparaît clairement sur la figure 1 : le numéro du carreau entier comportera d'abord les deux chiffres de l'abscisse I (colonne), puis les deux chiffres de l'ordonnée J (ligne) ; il sera donc égal à $100 I + J$. I et J doivent bien entendu être compris entre 0 et 99.

La figure 4 montre comment un carreau entier peut être décomposé en carreaux partiels. Ceux-ci sont numérotés à l'intérieur du carreau entier, de 1 à M avec $M \leq 4$, dans un ordre quelconque. Le numéro complet du carreau partiel est formé du numéro de repérage du carreau entier qui le contient suivi de son propre numéro interne.

Sur la même figure, la définition complète de la carte des données pour chaque carreau est présentée à titre d'exemple pour le bassin versant de Korhogo. Pour le bassin de l'Agneby (République de Côte-d'Ivoire) une autre définition de la carte a été utilisée. Ce changement de définition entraîne de légères modifications du programme général.

On notera que le fait de désigner, sur la carte de présentation d'un carreau entier, chaque carreau partiel non par son propre numéro, mais par le numéro du carreau partiel (d'un carreau entier adjacent) dans lequel il est supposé se déverser, permet de définir entièrement la structure du drainage et, par un léger artifice de programmation, de trier automatiquement, dans une banque de données, tous les carreaux partiels composant un bassin versant défini uniquement par le numéro du carreau partiel situé immédiatement à l'amont de son exutoire. Ces opérations ne sont possibles que parce que l'on astreint un carreau partiel donné à ne se drainer que dans un seul autre carreau partiel.

En fait, le numéro propre à chaque carreau partiel est défini implicitement par la position qui lui est octroyée sur la carte de présentation des données.

Les noms de variables choisis pour représenter dans le modèle les éléments du drainage et les éléments physiographiques sont indiqués dans les deux paragraphes suivants.

2.1.1 Caractéristiques de drainage.

- L : indice du carreau entier introduit.
LL : indice du carreau partiel introduit.
NDCE(L) : numéro du carreau entier composé conventionnellement par la somme de l'abscisse multipliée par 100 et de l'ordonnée du carreau entier défini sur la carte topographique. Les valeurs des abscisses I et des ordonnées J restent comprises entre 0 et 99 :

$$NDCE(L) = I * 100 + J$$

- N : nombre de carreaux partiels sur le carreau entier NDCE(L). Ce nombre varie de 1 à une limite fixée à 4. L'indice des carreaux partiels de ce carreau est M.
SC(M) : surface du carreau partiel M exprimée en fraction de celle du carreau entier. Par convention, si le carreau entier n'est pas fractionné, donc composé d'un seul carreau partiel, la fraction de surface du seul carreau partiel est prise égale à zéro.
NVCP(M) : numéro du carreau partiel dans lequel se vidange le carreau partiel M de ce carreau entier. Le numéro du carreau partiel est composé conventionnellement par la somme du numéro du carreau entier multiplié par 10, dont il fait partie, et de l'indice du carreau partiel.

Dans le programme, les carreaux partiels NVCP(M) sont rangés dans une liste NUMS(LL), tandis que les carreaux partiels du propre carreau NDCE(L) sont rangés dans une liste NUME(LL).

$$NUME(LL) \text{ est égal à } NDCE(L) * 10 + M$$

Grâce à ces deux conventions, il est très facile de repérer sur la carte topographique le carreau partiel défini par son numéro. En effet, si 14092 est ce numéro, on déduit :

$$\begin{aligned} J &= 14 \\ I &= 9 \\ M &= 2 \end{aligned}$$

et la localisation sur la carte est immédiate.

2.1.2 Caractéristiques physiologiques.

On prendra comme exemple le bassin représentatif de Korhogo (Côte d'Ivoire).

- PL(L) : surface de lac ou de marais sur le carreau, exprimée en fraction de la surface du carreau entier.
PF(L) (1) : surface de la couverture forestière, exprimée en fraction de la surface du carreau entier.
PT(L) (1) : surface couverte en bois de teck, exprimée en fraction de la surface du carreau entier.

- PA(L) (1) : surface couverte d'anacardium exprimée en fraction de la surface du carreau entier.
 PENT(L) : pente moyenne du sol dans le carreau entier.
 ALT(L) : altitude moyenne du sol du carreau exprimée en mètres.
 NSL : nombre de types de sol. On limite à deux le nombre de types de sol par carreau entier.
 NSL1 : numéro de la référence générale du type de sol du bassin pour le premier type de sol du carreau.
 NPSL : pourcentage de ce type de sol sur le carreau entier.
 NSL2 : numéro de la référence générale au deuxième type de sol. Dans le cas où NSL a pour valeur deux, le pourcentage de ce deuxième type de sol est le complément à 100 du premier.
 ALTSO(L) : altitude moyenne du socle sur ce carreau exprimée en mètre.
 ALTTT(L) : altitude moyenne en mètre du toit de la zone inférieure du sous-sol sur ce carreau.
 PERM(L) : perméabilité moyenne en millimètre par heure du sous-sol sur ce carreau.
 PORO(L) : porosité moyenne du sous-sol sur ce carreau.

La définition des caractéristiques physiographiques n'est pas limitative, toute autre information pouvant y être incluse. Par exemple, pour le bassin versant de l'Agneby, les caractéristiques — (1) — n'ont pas été introduites. Par contre un système de définition pour la végétation a été introduite d'une manière comparable à celle qu'on a adoptée pour les sols.

2.2. ORGANISATION D'AVANT EN AMONT DES CARREAUX DU BASSIN. SOUS-PROGRAMME ORGAN1, MATRICES MACE ET MACP.

Au moment de la lecture des cartes des caractéristiques physiographiques d'une région englobant au moins tout le bassin versant à étudier, on a constitué, dans l'ordre de cette lecture, les listes NUME et NUMS, *donnant l'une le numéro du carreau partiel drainé et l'autre le numéro du carreau partiel qui réceptionne ce drainage.*

Le programme ORGAN1 :

- assure la sélection NODC des carreaux qui, faisant partie de NUME, constituent le bassin versant, et les classe dans l'ordre normal de calcul pour le transfert de carreaux à carreaux ;
- détermine quel est le plus grand nombre de carreaux qui doivent être traversés pour aller à l'exutoire à partir du point du bassin qui en est hydrologiquement le plus éloigné ;
- compte et range dans une matrice le nombre de carreaux qui alimentent chacun des NCP carreaux partiels de la sélection NODC.

Le numéro du carreau partiel contenant l'exutoire du bassin est lu sur une carte spéciale, ce qui permet d'effectuer les initialisations de ce programme, en donnant au premier élément de NODC, NUME(1), la valeur de ce numéro. Le vecteur NAVAL, qui groupe temporairement tous les carreaux réceptionnant le drainage des carreaux partiels de la ligne isochronique supérieure, est initialisé à la valeur NUME(1) pour NT = 1 et N = 1.

NT désigne le numéro de la ligne isochrone et N le nombre de carreaux partiels qui constituent cette ligne isochrone.

On recherche tous les carreaux de la liste NUMS qui ont même numéro que ceux de la liste NAVAL et on enregistre dans un vecteur NAMONT tous les numéros de la liste NUME liés à ceux de la liste NUMS, c'est-à-dire tels que NUMS = NAVAL. Hydrauliquement cela revient à chercher les carreaux contigus «AMONT» qui alimentent directement, *dans l'ordre et successivement*, tous les carreaux «AVANT» contenus dans la liste NAVAL.

Quand cette liste NAMONT est complète, on adjoint au vecteur NODC cette dernière liste NAMONT dans le même ordre. Puis, passant à un ordre supérieur d'isochronisme, on appellera NAVAL la liste NAMONT précédemment définie et on recommencera le même processus de recherche de proche en proche jusqu'à l'amont du bassin.

Quand on ne trouve plus aucun carreau amont pour alimenter la bande de carreau «AVANT» qu'on vient de calculer, l'exploration du bassin est terminée. La durée d'isochronisme, exprimée en nombre de carreaux, se trouve évaluée du même coup. Il ne s'agit plus maintenant que de compter le nombre de carreaux qui alimentent successivement chacun des carreaux de la liste NODC, et ce nombre est consigné dans le vecteur MONCE.

Insistons sur le fait que la recherche de la liste «NAMONT» en fonction de la liste «NAVAL» engendre un ordre de priorité et un classement successif tel que la liste des carreaux alimentant effectivement, dans l'ordre, les carreaux de la liste NODC, est cette même liste à laquelle le premier élément a été enlevé. Cette propriété facilite le calcul des transferts de carreau à carreau à condition de réaliser un nouvel indexage, sous forme de compteur, chaque fois qu'il sera nécessaire d'effectuer un calcul.

Le schéma de la figure 5 présente la logique de recherche de ce sous-programme essentiel pour l'organisation de la structure du modèle.

Après l'appel du sous-programme ORGAN1, la structure du modèle se trouve donc complètement définie par la liste NODC et par le vecteur MONCE qui associe à chaque carreau partiel de NODC le nombre de carreaux partiels qui contribuent à son alimentation.

Initialisation

N = 1
 NAVAL (1) = NUME (1)
 NODC (1) = NUME (1)
 NT = 1
 NV = 1
 NVV = 0

NT = NT + 1
 NU = 0
 NUO = 0

*Pour chaque ligne isochrone NT recherchons la liste NAMONT des carreaux alimentant les carreaux de la liste NAVAL NAMONT ∈ NUME ,
 NAVAL ∈ NUMS*

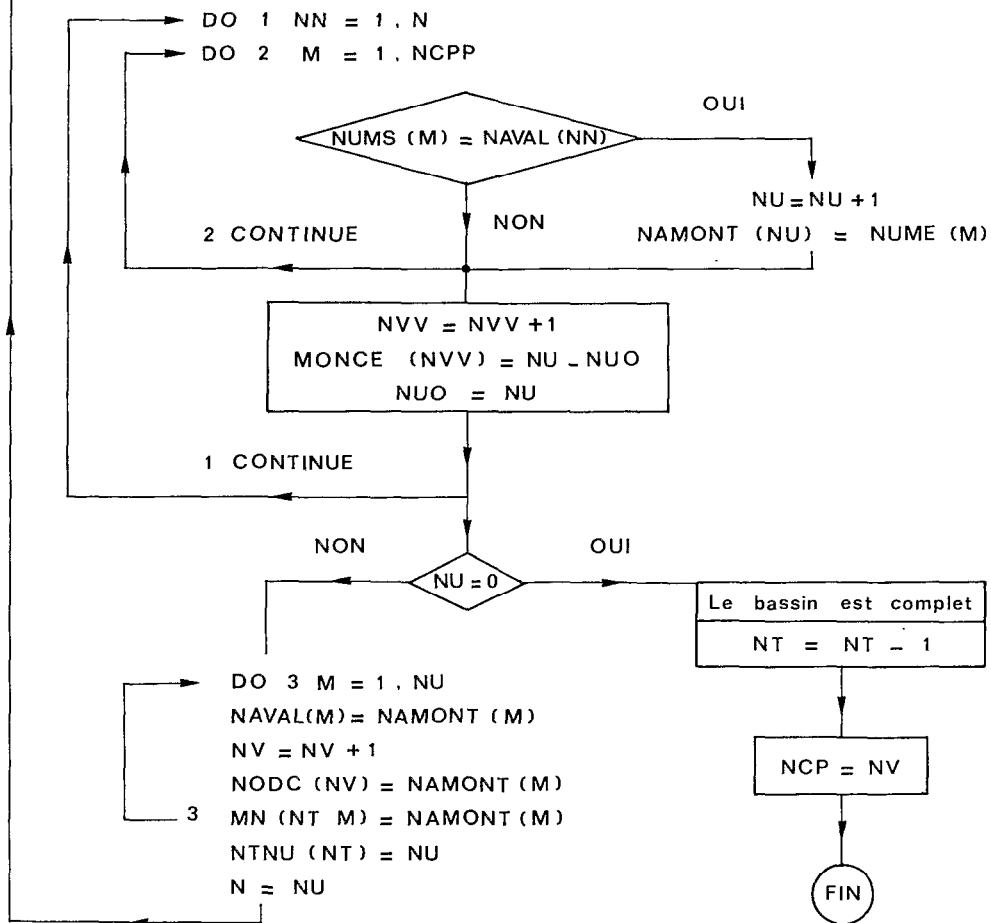


Fig. 5. — Schéma logique de la sous-routine ORGANI

On dispose, d'autre part, du tableau NOCE qui a été formé dans un ordre quelconque au moment de la lecture des caractéristiques des carreaux entiers (voir 2.1). Il est alors possible d'arranger ces caractéristiques dans un ordre qui soit conforme à NODC. Pour cela, on prend successivement les valeurs de NODC qui représentent les numéros de carreaux partiels. Sous une forme structurée, on les divise par 10 en division entière pour avoir les numéros des carreaux entiers qui les contiennent ; pour ceux d'entre eux qui ne sont pas encore apparus, on va chercher dans le tableau NOCE leurs caractéristiques qu'on transfère dans une matrice MACE suivant leur ordre d'apparition. Outre ces caractéristiques déjà définies, MACE contient un certain nombre d'éléments dont il sera fait état ultérieurement.

On constitue également une matrice MACP relative aux caractéristiques des carreaux partiels. Ces caractéristiques sont soit lues directement en données d'entrée (surfaces en pourcentage du carreau entier), soit calculées à l'intérieur du programme :

- surface du bassin amont à l'issue du carreau ;
- surface totale des lacs dans le bassin amont ;
- indice du carreau entier dont il fait partie (numéro d'ordre dans la matrice MACE) ;
- indice du carreau partiel aval (son numéro d'ordre dans la matrice MACP) ;
- vecteur MONCE.

3. PRODUCTION ET STOCKAGE SUR UN CARREAU ENTIER

On a vu que le carreau est défini comme un élément de surface du bassin considéré comme homogène. Il convient maintenant de choisir un pas de temps de calcul qui en fait est généralement imposé par la fréquence des relevés climatologiques disponibles.

Compte tenu de ces deux définitions, on se propose de poser les équations hydrologiques de base permettant d'évaluer, selon les valeurs locales des variables météorologiques, les volumes d'eau libérés par ces carreaux à chaque pas de temps, étant entendu qu'il s'agit d'eau d'origine locale et non pas d'eau en transit. Au moment du transfert d'eau d'un carreau à l'autre, et de la prise en compte de cette eau libérée, on peut, si besoin est, introduire les interactions entre ces eaux d'origines différentes. Les données météorologiques prises en compte peuvent être soit celles qui sont introduites directement à partir des observations effectuées aux stations auxquelles le carreau est affecté, soit des valeurs modifiées pour tenir compte de certaines modifications physiographiques, par exemple de l'altitude moyenne du carreau par rapport à celle de la station de référence.

Pour un carreau qui ne reçoit aucune alimentation à partir des carreaux voisins, la série chronologique des volumes qui en sont issus est l'hydrogramme réel observé à la sortie de ce carreau. Pour les autres carreaux, la série chronologique des volumes d'origine locale issus de chacun d'eux serait, à une déformation près, l'hydrogramme résultant de la différence entre l'hydrogramme «aval» et l'hydrogramme «amont» décalés du temps de parcours sur le carreau.

C'est la loi de détermination de cette série chronologique des volumes que nous cherchons. De toutes les manières et une façon de relier cette série aux données hydrométéorologiques d'entrée (fonctions de production et de modulation des débits sur ce carreau), nous ne voulons retenir que le mode le plus simple d'application. Le comportement de cette surface élémentaire, qui intègre déjà une grande quantité de réactions élémentaires, sera assimilé à un système de réservoirs possédant plusieurs orifices.

On prendra comme unité de surface le carreau entier et on se limitera, pour la facilité de l'exposé, aux réactions de cette surface aux impulsions pluviométriques. Ce qui suit concerne la production propre à ce carreau à l'exclusion des débits transités en provenance de carreaux adjacents. Un carreau ainsi isolé constitue un système qui a :

- comme entrées : les précipitations (P),
- comme sorties : l'évapotranspiration (ET) et l'écoulement (Q).

Il est possible et tout naturel de vouloir représenter cette unité de surface comme l'association d'un ensemble de parcelles indépendantes que l'on étudie séparément et de faire la somme de leurs réactions. Ce serait oublier que les interactions entre chacune des parcelles ne sont pas nulles mais au contraire prépondérantes. C'est pourquoi on a pris ce carreau comme un ensemble (sol, lac, marais). On a assimilé la partie sol à un réservoir unique possédant des orifices tels que, sous l'action des précipitations et de l'évapotranspiration, l'écoulement qui en est issu soit comparable à l'écoulement issu d'un bassin isolé de mêmes caractéristiques.

Si HS est la lame d'eau stockée dans ce réservoir «sol», dit réservoir principal, et HN la lame d'eau stockée dans la nappe, on doit vérifier, pour tout intervalle de temps, l'équation :

$$\sum_{t=t_0}^{t=t_1} P = \sum_{t=t_0}^{t=t_1} ET + \sum_{t=t_0}^{t=t_1} Q + (HS_{t_1} - HS_{t_0}) + (HN_{t_1} - HN_{t_0})$$

Des exemples extrêmes et simples permettront de dégager les idées de base.

Un bassin gorgé d'eau laissera s'écouler tout l'apport excédentaire : ce réservoir doit posséder un déversoir à la partie supérieure pour simuler le ruissellement pur.

Un bassin qui n'est plus soumis à des précipitations fournit un débit encore important : on ménagera donc un orifice à la base du réservoir principal, pour simuler l'écoulement en période de tarissement rapide.

Comme les morts-terrains contribuent à l'étiage, on a tenu à placer un réservoir nappe, distinct du réservoir principal et alimenté par lui proportionnellement à la charge au-delà d'un certain niveau, cette alimentation étant limitée par une infiltration maximale ; ce réservoir s'écoule progressivement selon une loi bien définie.

Chaque fois que survient une crue de ruissellement, une vidange rapide des zones superficielles se produit immédiatement après la fin du ruissellement. Pour simuler cet écoulement rapide, on a placé un orifice à mi-capacité du réservoir principal, cela dans une première interprétation. Cette vidange fait place ensuite aux différents modes du tarissement de la nappe.

Il est possible de chiffrer le coefficient de vidange de l'orifice inférieur en tenant compte du débit d'étiage et des capacités stockées HS et HN ; il est par contre beaucoup plus difficile de chiffrer celui de la partie médiane, appelé coefficient de vidange rapide. En un premier temps, ce dernier est supposé lié à la pente moyenne du carreau et à l'importance du couvert forestier.

Les pertes par évapotranspiration sont fonction de l'évapotranspiration potentielle pour la saison, et du contenu en eau du réservoir HS. L'évapotranspiration réelle croît linéairement en fonction du contenu en eau du réservoir principal, de zéro à la valeur de l'évapotranspiration potentielle. Cette évapotranspiration potentielle est évaluée par la formule de THORNTHWAITTE à partir de la température observée sur le carreau. Si l'on ne dispose pas de données sur les températures journalières, l'évapotranspiration potentielle sera l'évaporation « bac » modulée par l'altitude pour tenir compte de la décroissance de l'évapotranspiration avec cette dernière.

Ce schéma de base peut être modifié selon les caractéristiques régionales : absence de nappes superficielles, absence de ruissellement, ou écoulement de base négligeable et non permanent. Il peut encore être rendu plus simpliste ou au contraire plus élaboré, selon le niveau de connaissance de la formation des apports.

Toutefois, étant donné le nombre de carreaux pour lesquels chacune des caractéristiques doit être évaluée, nous préférons avoir recours à une méthodologie rationnelle pour effectuer leur détermination en fonction des données physiographiques connues, et simplifier les hypothèses.

Ces éléments sont représentés sur le schéma de la figure 6.

- HS : lame d'eau stockée dans le sol et soumise aux échanges avec l'atmosphère.
 HN : lame d'eau stockée dans la nappe (si elle existe).
 E, P, : évaporation et précipitation (données d'entrée).
 HO, XKS, XKN, I : lame de rétention, coefficient de vidange rapide, coefficient de vidange lente, infiltration (paramètres du modèle).

Toutefois, HO et I découlent des caractéristiques physiques du sol, de même que XKS et XKN.

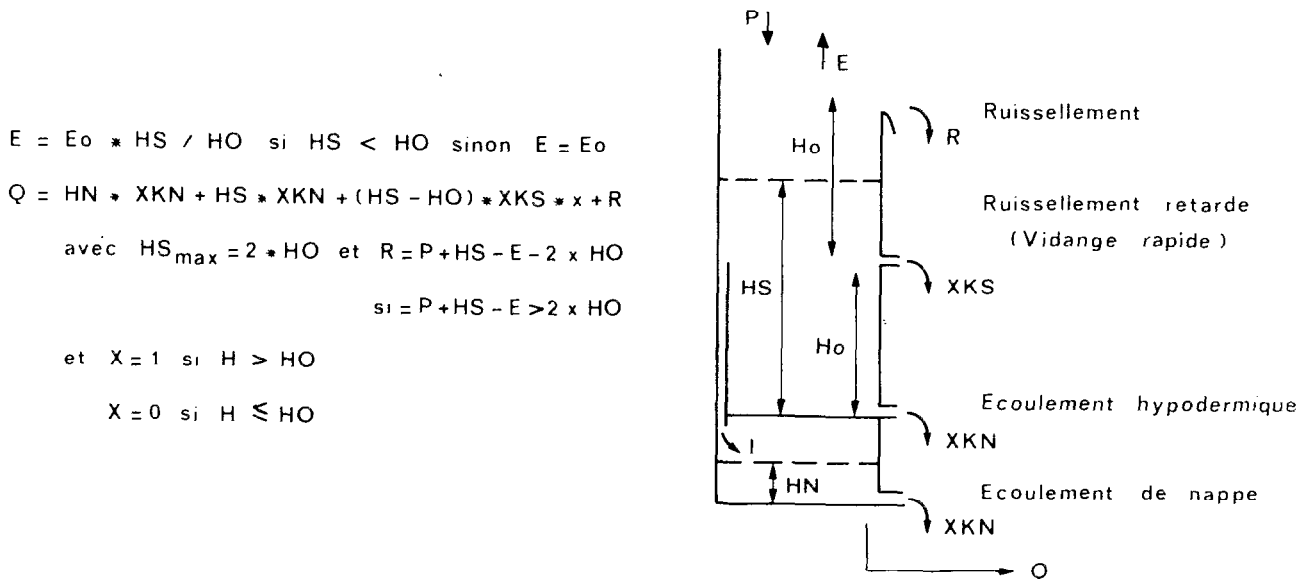


Fig. 6. — Fonction Production.

L'innovation, dans ce modèle, est d'avoir cherché non pas à préciser la physique du phénomène à l'échelle décimétrique ou métrique, mais à simuler, à l'échelle d'un élément fini de superficie 100 km^2 (ou plus petite mais constante), les phénomènes hydrologiques connus grâce à l'étude des bassins versants expérimentaux, ou bien à vérifier, à ces mêmes échelles, le comportement global supposé d'un élément de bassin aux caractéristiques extrêmes (bassin avec lacs et marécages, bassin perméable, etc.).

Le modèle permet d'avoir une réponse hydrologique différente sur chaque élément fini compte tenu des caractéristiques physiographiques influençant la loi de production des apports, comme d'ailleurs la loi de formation de l'onde de crue.

L'expérience acquise par l'étude des bassins versants expérimentaux facilite la schématisation de cette fonction de production et la recherche des lois reliant ses paramètres aux caractéristiques physiographiques de la surface élémentaire finie.

Toutefois, dans des cas très particuliers, par exemple celui d'un bassin versant très hétérogène du point de vue hydrologique (climat, géologie, végétation différents chacun dans l'espace...) et remarquablement bien observé hydrologiquement dans le temps et dans l'espace, il est alors possible, grâce aux moyens puissants en informatique et à l'outil qu'est le modèle mathématique, de procéder à la recherche d'une fonction de production susceptible de rendre la simulation acceptable en tous points.

Procédant alors systématiquement sur plusieurs bassins versants, il devient possible d'obtenir une fonction idéale, et nous avons toutes les chances de cerner les incompatibilités et les incohérences introduites au moment de la mise en forme de cette fonction.

Il reste à définir la forme à donner aux relations entre les coefficients et les paramètres physiographiques retenus.

3.1. COEFFICIENT DE VIDANGE DES EAUX DE SUBSURFACE.

On propose ici un des concepts possibles pour l'évaluation de ce coefficient.

Pour lier l'algorithme à une notion hydraulique, on dira que l'écoulement de ces eaux est du type turbulent. La vitesse d'écoulement est alors proportionnelle à la racine carrée de la charge qui, dans ce cas, est proportionnelle en première approximation à la pente moyenne du carreau. Avec cette hypothèse, le coefficient de vidange XKS est proportionnel à la racine carrée de la pente.

D'autre part, la couverture forestière favorise l'infiltration et le stockage des eaux de subsurface. Or, comme ce coefficient XKS représente une intégration sur le carreau des valeurs ponctuelles de XKS, on propose qu'il soit aussi fonction de la couverture forestière comme facteur secondaire.

La relation est alors de la forme :

$$\begin{aligned} \text{XKS} &= \text{PENT}^{1/2} * e^{-\text{PF}/100} \\ \text{PENT} &= \text{pente en pour mille } (‰) \\ \text{PF} &= \text{pourcentage de forêt} \end{aligned}$$

Cette relation ne tente de représenter que le sens de variation de XKS et ne doit être prise que comme un des moyens de rattacher les paramètres du modèle aux caractéristiques physiques.

3.2. COEFFICIENT DE VIDANGE DES EAUX SOUTERRAINES.

Il dépend du développement de la nappe tant en surface qu'en profondeur. On l'appellera XKN.

Si on n'a pas introduit, dans les caractéristiques physiographiques du carreau, des indications sur l'importance des morts-terrains en épaisseur et en étendue, ce coefficient sera arbitrairement choisi homogène pour le bassin, sauf si des mesures d'étiage montrent que les débits de base ne décroissent pas de la même façon dans l'espace (hétérogénéité du tarissement).

En s'appuyant sur la loi du tarissement, il est alors possible de déterminer la valeur de XKN correspondant à un pas de temps égal à une journée.

Dans la carte de définitions des caractéristiques physiographiques des carreaux, il serait souhaitable d'y ajouter les caractéristiques du sous-sol du point de vue hydrogéologique, hauteur moyenne des morts-terrains, perméabilité, etc. Elles permettraient de préciser aussi bien les paramètres dynamiques de cet écoulement (lois de vidange) que la capacité des réservoirs mis en jeu, ce qui est peut être encore plus important.

3.3. COEFFICIENT DE VIDANGE DES MARAIS.

Pour la simulation des débits dans le nord de la province de Québec, où les marais sont très nombreux, et avec le peu de connaissance qu'on a de leur fonctionnement, on s'est contenté de prendre un coefficient de vidange constant pour tous ces marais. Ce coefficient ne joue que pour la libération de l'eau du carreau au stade de la production ; que se passe-t-il quand les marais sont le siège d'un épandage des eaux venues des carreaux amont ? Bien des questions restent posées pour ce cas très particulier concernant des études hydrologiques régionales.

Toujours est-il que la distinction entre l'influence des petits lacs et celle des marais reste délicate dans les cas que nous avons étudiés. On a remarqué des variations identiques de niveau dans lacs et marais de même taille au cours de deux années d'études sur des bassins de la Baie James observés en 1959 et 1960. Ceci nous a conduit à admettre que le mode de transfert de carreau à carreau ne dépend que de la somme de la surface des lacs contenus dans ce carreau, par suite de la définition des marais dans la banque physiographique.

3.4. REMARQUES GÉNÉRALES.

Après avoir expérimenté un modèle conçu de cette façon, il convient de faire un retour en arrière pour essayer de mieux comprendre les liaisons entre les différents éléments considérés à l'intérieur d'un carreau pour simuler la production de l'écoulement (lac, sol, marais...), une telle décomposition en éléments supposés indépendants pouvant n'être pas conforme à la réalité.

Le rôle des coefficients de vidange est de simuler au mieux la chronologie des débits issus du carreau, en dehors du réseau de drainage assurant le transfert. Sommes-nous réalistes ? Question importante à laquelle il n'est pas possible de répondre de façon satisfaisante car nous ne disposons jamais de toutes les données suffisantes, mais qu'il est nécessaire de poser.

Si on admet par exemple une rétention maximale constante pour les sols de tous les carreaux, comment peut-on admettre que l'eau produite sur le carreau et entrant dans son propre réseau hydrographique est une sommation pure et simple des diverses eaux issues du sol, des marais, des lacs, alors qu'il y a interaction entre eaux des lacs, eaux des marais, eaux des nappes et l'écoulement ? En effet, avant d'être disponibles, ces eaux transitent dans les lacs et marais quelle que soit leur provenance. Nous aurions peut-être intérêt, pour simuler le produit final, à modifier les caractéristiques de la fonction de production en provenance du sol, par l'importance des lacs et des marais. On pourrait dire par exemple que la rétention maximale est liée aux superficies des lacs et des marais par une relation de la forme :

$$\text{RETM}_{\text{MAX}} = \text{RETM} \left(1 + \frac{S_{\text{lac}} + S_{\text{marais}}}{S_{\text{totale du carreau}}} \right)$$

c'est-à-dire que le produit final est obtenu sur le carreau étudié par un amortissement de l'ensemble de ses apports, dans les lacs et marais de son propre réseau hydrographique. RETM désigne la rétention du sol dans le cas où le carreau ne comporte ni lac ni marais.

Il serait fort utile de distinguer entre les lacs appartenant au réseau général de transit, dont l'action est étudiée plus loin, et les lacs appartenant au réseau hydrographique propre au carreau dont l'action, bien que physiquement identique, affecte de toutes autres variables. Malheureusement, lorsqu'on utilise les données d'une banque physiographique, cette distinction n'est pas toujours possible.

4. TRANSFERTS ET FORMATION DE L'ONDE.

4.1. PRÉPARATION DU TRANSFERT.

Dans la logique du modèle, les fonctions de production et de transfert ne sont pas strictement indépendantes : elles sont liées par le choix des pas de temps. On a vu que la fonction de production opère en fait un bilan partiel du carreau entier, excluant les entrées provenant des carreaux adjacents et le bilan des lacs. Ce bilan est effectué suivant un pas de temps DTP qui, dans le présent exposé, est pris égal à la journée.

Dans un calcul suivant, on introduit le bilan des lacs intégrés au réseau de transfert et de ce réseau lui-même.

Ce bilan s'évalue très simplement par la formule :

$$P = E + dH$$

avec : P = précipitation

E = évaporation d'une nappe d'eau

dH = variation du niveau de la retenue

La production totale d'eau sur le carreau s'exprime alors, en lame d'eau par :

$$VT = QL * \left(\frac{100 - PL}{100} \right) + (P - E) * \frac{PL}{100}$$

avec : QL = lame produite par l'intermédiaire du sol et des marais

PL = pourcentage de lac et d'eau à surface libre sur le carreau

Cet apport VT peut devenir négatif si les apports sur le sol ne peuvent compenser les pertes par évaporation des surfaces d'eau PL.

Le volume d'eau VT positif ou négatif ainsi produit est réparti, au prorata de leurs superficies, sur les carreaux partiels composant le carreau entier. Pour chaque carreau partiel, le volume ainsi attribué VP est envoyé dans le réseau de drainage propre de ce carreau avec un débit uniforme dans l'intervalle de temps DTP.

On considère, d'autre part, le volume VE entrant, pendant un intervalle de temps DTT, dans chaque carreau partiel, en provenance des carreaux partiels amont qui lui sont affectés. DTT doit être contenu un nombre entier de fois dans DTP. VE est additionné à la fraction de VP correspondant à l'intervalle de temps DTT. (VP/n si DTP = nDTT), et le volume résultant est transféré instantanément dans le réseau hydrographique général.

Si, dans le calcul, le terme $VS = VP/n + VE$ se trouve négatif, cela veut dire que les apports des carreaux adjacents au carreau partiel ne compensent pas le déficit de ce carreau, calculé comme une fraction du déficit du carreau entier. Dans ce cas, on écrit $VS = 0$.

Il devient alors nécessaire d'adjoindre la contrainte suivante : le cumulé des valeurs absolues des apports négatifs consécutifs doit rester inférieur ou égal au volume de toutes les retenues d'eau à déversement nul de ce carreau. En supposant que la superficie des lacs ne varie pas avec le niveau de l'eau, il suffirait, pour rendre compte du phénomène, d'introduire un volume total à déversement nul des retenues sur chaque carreau.

Par exemple, dans tous les pays pour lesquels l'écoulement des cours d'eau est temporaire et où l'évaporation des nappes d'eau reste très importante par rapport à l'écoulement produit au sol, la capacité maximale de ces retenues correspondant à l'écoulement nul doit être introduite pour simuler les débits. Le modèle actuel ne comporte pas ce paramètre, mais il peut facilement être transformé pour être adapté aux régions possédant ce genre de caractère. Il suffit d'inclure, au schéma logique du transfert, quelques équations et d'introduire les valeurs $SAIM_i$ représentatives de ces capacités maximales à déversement nul des retenues, pour chaque carreau, au début du programme.

Il est possible, si ces données sont connues, d'introduire non seulement les valeurs des capacités maximales des lacs, mais également la variation de leurs surfaces ou de leurs volumes en fonction de leur remplissage. On peut alors tenir compte, pour le calcul de l'évaporation, de la variation de la surface. Il est indispensable de procéder ainsi lorsqu'on désire introduire dans le modèle des réservoirs artificiels, pour lesquels il est de plus nécessaire de connaître le processus de gestion.

4.2. COEFFICIENTS DE TRANSFERT DE CARREAU A CARREAU.

On a indiqué que le pas de temps DTT utilisé pour le transfert était différent du pas de temps DTP qui sert pour la production ; il a été précisé que DTP doit contenir un nombre entier de fois DTT. Cette contrainte est nécessaire pour le calcul, qui se fait obligatoirement aux différences finies, mais le choix de DTT est en fait lié au temps de transport dans le réseau hydrographique principal pour la traversée d'un carreau.

Dans le sous-programme ORGAN1, on a compté le nombre NT de carreaux entiers traversés par le cheminement le plus long. On suppose connu, d'autre part, le temps de concentration du bassin, c'est-à-dire le temps mis par un volume d'eau, pour aller à l'exutoire du point du bassin qui en est le plus éloigné, soit TC. Le pas de temps théorique est alors égal à TC/NT .

TC peut être évalué par l'examen d'hydrogrammes de crues connues ou bien obtenu par un réglage paramétrique. En fait, l'expérience a montré qu'il était possible également de le tirer des caractéristiques physiographiques du bassin, notamment de sa pente moyenne.

Il est bien évident que la valeur de NT dépend de la dimension du carreau entier, d'après la définition qui en a été donnée plus haut. Il en est donc de même du pas de temps. Pour les nécessités du calcul, la valeur de ce pas de temps ainsi obtenue doit être arrondie à la valeur immédiatement inférieure permettant de respecter la condition $DTP = nDTT$ pour n entier. Dans la pratique, on travaille non pas avec le pas de temps, mais avec n.

On prendra le cas d'un réseau sans réservoir de stockage autre qu'un lit sans débordements trop importants et, pour le tronçon contenu dans un carreau, on essaiera de concrétiser la notion de coefficient de transfert.

Pour un carreau de 10 km de côté, compte tenu des méandres sur chaque carreau entier, on peut estimer que la longueur du cours principal est en moyenne de 10 km. Supposons que le pas de temps adopté soit de 4 heures. Si toute la masse d'eau située dans ce carreau à l'instant origine en est sortie au bout de ce pas de temps, celui-ci est intimement lié à la vitesse moyenne du cours d'eau, la vitesse moyenne de transport est alors de 0,7 m/s, et le coefficient de transfert est égal à l'unité. S'il se trouve que la vitesse moyenne est très différente, le pas de temps est à modifier. Il convient de prendre toujours un pas de temps inférieur à la limite correspondant à la valeur maximale de la vitesse. Dans ce cas, le coefficient de transfert est toujours voisin de l'unité pour le maximum de débit et décroît très faiblement avec le volume transité.

Supposons maintenant qu'il y ait un grand lac dans le réseau de ce carreau. Il se produit alors un stockage important lors d'une crue et c'est alors que le coefficient de transfert présente de l'intérêt. Le laminage dans le lac ne pose pas de problèmes si l'on connaît parfaitement la courbe hauteur volume de celui-ci et la loi de vidange $Q(H)$ de l'exutoire. Mais il n'y a pas un lac sur 100 pour lequel on connaisse ces deux données simultanément et principalement la seconde. Admettons que la loi de vidange de ce lac soit linéaire :

$$Q = c.H$$

on supposera que Q est exprimé en volume pendant la durée du pas de temps.

Si la surface du lac reste constante dans le temps, on a :

$$Q = d.V$$

V étant le volume stocké et d étant proportionnel au coefficient de transfert XKT puisque V est aussi le volume en transit SA. Le volume issu de ce carreau est égal à $XKT * SA$. Le coefficient de transfert XKT se trouve relié à la surface totale du bassin versant d'alimentation ; il décroît quand cette dernière diminue, il décroît aussi lorsque la superficie du lac croît, le bassin total restant inchangé.

Nous supposons que la forme de variation de XKT est la suivante :

$$XKT_i = b \cdot \left[1 - e^{-a \frac{SBV_i}{SL_i}} \right]$$

SBV_i = surface amont du bassin

SL_i = surface des lacs du carreau y compris celle du réseau hydrographique de transfert

a et b = constantes d'ajustement

Seule l'expérience permettrait d'accepter ou de rejeter cette forme de courbe. La distinction entre lacs sur le réseau de transfert et lacs sur le réseau propre du carreau serait à faire pour mieux approcher l'influence des lacs.

4.3. VARIABILITÉ DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CARREAU A CARREAU AVEC LA DURÉE DU PAS DE TEMPS CHOISI ET INFLUENCE DES GRANDS LACS.

Le pas de temps DTT utilisé pour le transfert d'un carreau à l'autre étant une caractéristique inconnue pour les différentes parties du bassin versant, il est indispensable d'évaluer un premier coefficient de transfert (XKTJ) lié à un temps de référence, par exemple la journée, et de déterminer, pour le pas de temps finalement adopté dans le schéma de transfert, un nouveau coefficient de transfert (XKT) déduit du premier par une relation exacte.

Soit :

SA : le volume d'eau stocké dans le réseau du carreau partiel J au début du premier pas de temps d'une journée JO ;

NPJO : le nombre de pas de temps par jour ;

XKTJ : le coefficient de transfert établi pour la journée ;

XKT : le coefficient de transfert valable pour la période choisie.

S'il n'y avait pas alimentation de ce carreau à chacun des intervalles de temps successifs, le volume VJ issu de ce carreau en fin des NPJO pas (ou à la fin de la journée) sera :

$$VJ = SA * XKT \left[1 + \sum_{i=1}^{i=NPJO-1} (1 - XKT)^i \right]$$

ou bien aussi :

$$VJ = SA * XKTJ$$

d'où :

$$XKTJ = XKT \left[1 + \sum_{i=1}^{NPJO-1} (1 - XKT)^i \right]$$

Or, en posant :

$$1 - XKT = x$$

on a :

$$(1 - x) \left[1 + \sum_{i=1}^{NPJO-1} x^i \right] = 1 - x^{NPJO}$$

d'où :

$$XKTJ = XKT \frac{1 - x^{NPJO}}{1 - x}$$

ou :

$$XKT = 1 - (1 - XKTJ)^{1/NPJO}$$

Cette relation permet de s'affranchir de la valeur du pas de temps de calcul adopté pour le transfert. On doit alors évaluer aussi exactement que possible le coefficient XKTJ en fonction des caractéristiques physiographiques du carreau. Ici intervient une appréciation de l'ordre de grandeur de l'influence de ces caractéristiques.

Pour tous les carreaux sans lacs, la vidange du réseau hydrographique va s'effectuer en totalité au cours de la journée ; par contre, pour tous les autres, la vidange sera d'autant plus longue que la superficie des lacs sera plus importante.

Dans la définition du coefficient de transfert, il ne sera pas tenu compte en réalité de l'effet de la variation de la vitesse de déplacement des masses d'eau dans le réseau ; seul l'effet d'amortissement de l'onde de crue dans les lacs et dans le réseau interviendra. Le premier effet pourrait être éventuellement traité dans le cas d'un bassin sans lac en introduisant les caractéristiques : pente du lit, largeur du lit et longueur du lit pour chaque carreau.

Le coefficient de transfert pour la journée sera alors lié à la surface des lacs et du réseau de transfert dans le carreau partiel, à la surface du bassin versant d'alimentation de ce carreau. Le coefficient XKTJ peut, dans ces conditions, être estimé par :

$$XKTJ = 1 - e^{-c \frac{SBV}{SL}}$$

SBV = surface totale du bassin versant à l'issue du carreau ;

SL = surface des lacs du carreau y compris le réseau hydrographique de transfert.

Une des limites d'application du modèle résulte de la dimension des lacs du bassin. En effet, pour des lacs de plus de 10 km de longueur (ou pour tous les grands lacs dont la partie située dans le carreau est inférieure à 50% de sa surface totale), les transferts successifs ne représentent pas en réalité ce qui résulte de l'effet d'amortissement. Il devient nécessaire d'évaluer la quantité d'eau entrant périodiquement dans l'ensemble du lac et de simuler hydrauliquement le débit de sortie en utilisant la même méthode de transfert, mais appliquée à l'exutoire du lac.

Il en résulte qu'après avoir décomposé le bassin en éléments de surface, on doit restructurer les grands lacs pour simuler leur comportement global. Il suffit seulement que la carte des données physiographiques possède un indice pour assurer cette restructuration au niveau du calcul de la superficie des lacs des carreaux amont faisant partie en réalité du lac dont l'exutoire se trouve dans le carreau étudié.

Pour contrôler l'efficacité du modèle il est possible, en plus des variables sorties actuellement, de rechercher, par exemple, au cours de la période de simulation, la hauteur maximale atteinte dans le réseau de chaque carreau, ce qui est possible puisqu'on a le volume stocké à chaque pas de temps ainsi que la surface du réseau hydrographique interne de transfert.

5. NATURE ET PRÉSENTATION DES DONNÉES D'ENTRÉE.

Pratiquement, les opérations se passent dans l'ordre suivant :

- (1) Introduction des données physiographiques ;
- (2) Calcul de la structure à partir de (1), c'est-à-dire constitution des matrices MACE et MACP ;
- (3) Introduction de la position des stations hydrométriques et de tous les points auxquels on désire sortir les débits, et repérage simultané, dans un vecteur NUMST, sur les carreaux partiels ;
- (4) Introduction de la position des stations météo et de leurs caractéristiques (altitude, etc.), repérage simultané dans un vecteur NOEP, sur les carreaux entiers et affectation simultanée des carreaux entiers aux postes météorologiques ;
- (5) Introduction des valeurs des paramètres non déduits des caractéristiques physiographiques ;
- (6) Introduction des données hydrométriques et météorologiques ;
- (7) Calcul : Exécution du travail.

On notera que pour les points (1), (3) et (4), les données peuvent rentrer dans le désordre. En outre, lors de l'exécution du travail, il est possible, à chaque pas du calcul, de redéfinir l'attribution des postes météorologiques, ce qui permet de tenir compte à chaque instant d'une défaillance d'un ou plusieurs postes, ou au contraire de prendre en compte tout poste nouvellement créé.

5.1. IDENTIFICATION DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES ET DES CARREAUX PARTIELS SUR LESQUELS LES SIMULATIONS SERONT DEMANDÉES.

Avec le système de repérage utilisé dans le modèle, il est nécessaire de fournir comme bases de recherche de ces carreaux :

- a) l'indice de l'abscisse,
- b) l'indice de l'ordonnée,
- c) l'indice d'ordre du carreau partiel dans le carreau entier qui le contient.

Ces bases, repérées sur cartes topographiques, permettent dans la liste NODC des carreaux partiels ordonnée pour le calcul du transfert des débits de carreau à carreau, de définir la position de ce carreau partiel, à l'issue duquel on désire obtenir le débit moyen calculé pour chaque pas de temps.

Dans les utilisations qui ont été faites jusqu'à présent du modèle, au cours de l'opération (3), on indique d'abord quels sont les points pour lesquels on possède les données hydrométriques (stations). Les positions de ces stations

sont lues en premier. Leurs données servent à contrôler la qualité des simulations. On indique ensuite les stations auxquelles on désire connaître les résultats de la simulation, soit dans un but pratique d'utilisation, soit dans le but de mieux représenter les écoulements, compte tenu des caractéristiques physiographiques particulières (zone à forte pente, zone à forte densité de lacs, zone à forte perméabilité, etc.).

En pratique, on a limité à dix le nombre de points de simulation dans l'étude des bassins versants (bassin de l'Agneby en République de Côte d'Ivoire et bassins québécois).

Etant donné par ailleurs que les débits observés aux stations du bassin sont consignés sur des cartes standard du Service Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. avec des conventions particulières (— 10, pour absence de mesures), il est essentiel de vérifier que l'ordre d'enregistrement des débits sur cartes correspond à celui indiqué pour les sorties de la simulation déduite des données physiographiques. Pour éviter des confusions entre stations, on établit une équivalence d'ordre entre les données et le numéro de code de la station ainsi que son nom en clair.

Pour les stations hydrométriques fictives, c'est-à-dire celles sur lesquelles nous n'avons aucune donnée hydrométrique, mais où nous désirons avoir une simulation des débits, il suffit d'introduire une carte blanche à la place des données de débits.

5.2. IDENTIFICATION DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET AFFECTATION DES CARREAUX ENTIERS DU BASSIN A CES POSTES.

Comme pour les points hydrométriques, les stations météo sont repérées par les coordonnées des carreaux entiers qui les contiennent. Pour l'attribution à un poste donné des carreaux entiers qui en dépendront, attribution qui est basée sur la distance séparant le centre de chaque carreau au poste en question, on suppose conventionnellement que chaque poste est situé au centre du carreau qui le contient. Pour cette attribution, on tient compte éventuellement de la disposition plus ou moins diagonale des carreaux les uns par rapport aux autres.

En pratique, on passe en revue la colonne de la matrice MACE réservée aux numéros des carreaux entiers. Pour chacun de ces carreaux, on calcule la distance à tous les postes pluviométriques et on choisit de lui affecter le poste pour lequel cette distance est la plus courte. Si plusieurs postes ont la même distance, on convient de choisir le dernier présenté. Cette opération exige qu'il n'y ait pas deux postes dans le carreau.

5.3. VARIABILITÉ DES CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN.

Pour un bassin versant donné, le quadrillage initialement effectué reste invariable dans le temps. Les caractéristiques physiographiques de chacun des carreaux restent généralement constantes dans le temps, bien que, par suite de la construction de retenues, de déboisement systématique, d'urbanisation, certaines de ces caractéristiques puissent être modifiées significativement à un instant donné. L'introduction de nouvelles valeurs ne modifie nullement le schéma de drainage et la structure du modèle, mais seulement certains paramètres relatifs aux carreaux entiers (coefficients de transfert, de vidange, etc.).

Par contre, lors de la création d'une ou de plusieurs dérivations, il est nécessaire de modifier la structure du modèle selon le nouveau schéma de drainage. Une telle modification, qui intéresse la phase d'exploitation du modèle, n'entraîne aucun nouveau réglage. Le modèle est en effet suffisamment souple pour que des modifications profondes de ce type n'entraînent que des changements des caractéristiques de transfert localisés à ces points particuliers.

5.4. VARIABILITÉ DE LA DENSITÉ DES DONNÉES.

Bien souvent, dans un premier stade, lors du réglage du modèle, on disposera de données météorologiques en densité variable dans l'espace et dans le temps ; il en est de même pour les débits observés.

Cette variabilité des données météorologiques n'influence ni la structure du modèle, ni les caractéristiques hydro-physiographiques, ni les variables d'état de chacun des carreaux (humidité des sols, contenu en eau des divers réservoirs) mais seulement la précision résultant de la quantité d'information introduite.

Un choix particulièrement lourd de conséquences doit être fait entre les deux possibilités suivantes :

— on substitue à la station météorologique défailante les données d'une autre station, ou des données déduites de corrélations avec celles des stations voisines ;

— on détermine un autre code de rattachement des carreaux aux stations effectivement disponibles.

La première méthode, souvent employée et critiquée, ne sera pas retenue dans ce modèle.

La seconde méthode sera retenue malgré l'hétérogénéité introduite dans les résultats. Cette solution nous donne satisfaction quand on sait que le nombre de stations météorologiques croît toujours avec la suite des années.

Malgré ses inconvénients théoriques, cette solution permet tout aussi bien d'introduire la totalité des informations recueillies pour la simulation, et permet de constater que les résultats obtenus sont d'autant plus précis que les données d'entrée sont nombreuses.

À partir du moment où le nombre de stations météorologiques varie, il est indispensable de réaliser une nouvelle affectation des carreaux aux postes en service. Cela ne pose que les problèmes de programmation relatifs à la connaissance des dates auxquelles il y a changement du nombre de postes climatologiques.

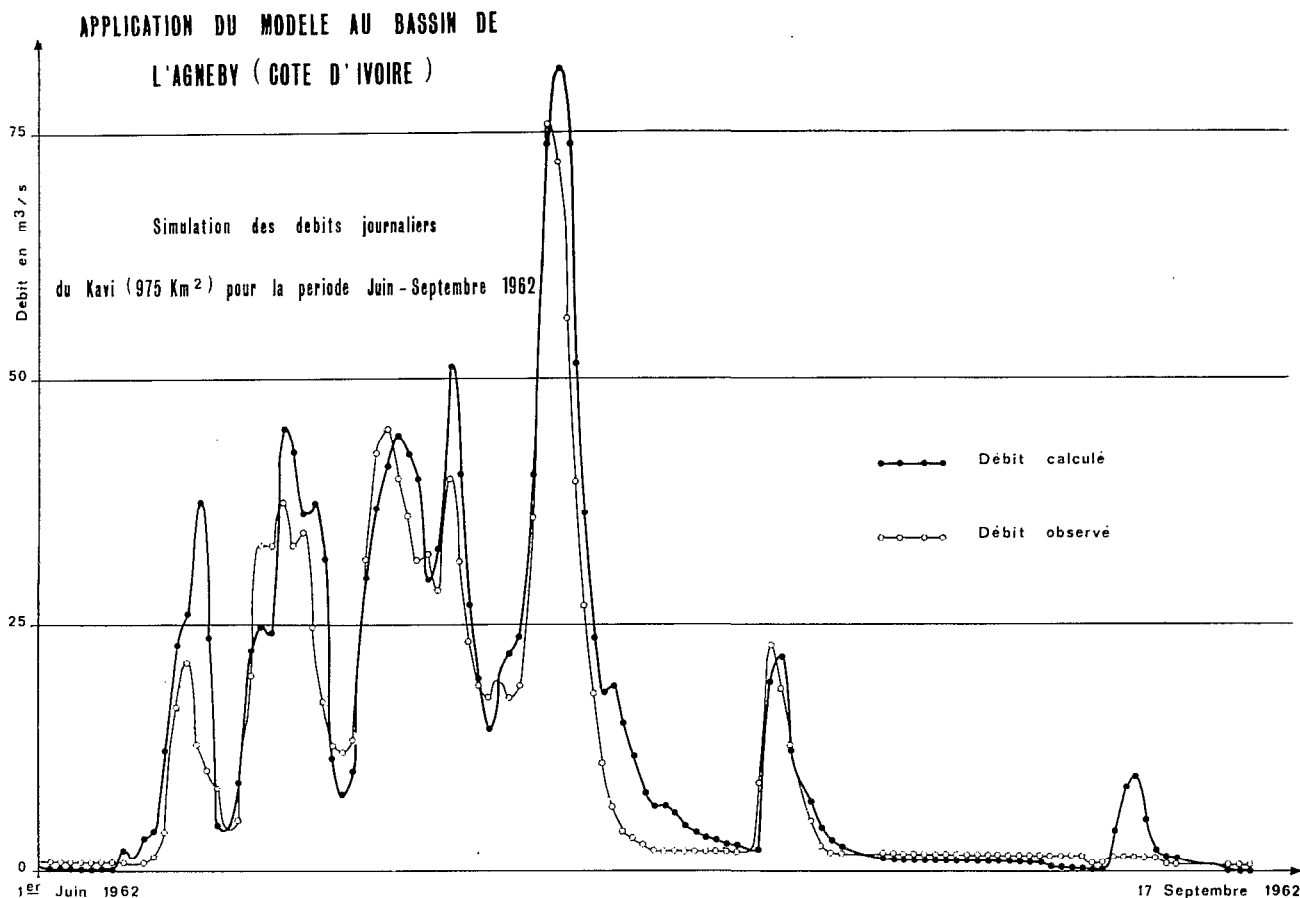


Fig. 7.

6. RÉGLAGE DU MODÈLE. SES POSSIBILITÉS D'ÉVOLUTION.

On a vu, dans la définition des algorithmes de production et de transfert, que la plupart des coefficients se déduisent, par des relations physiquement logiques, des caractéristiques physiographiques. Toutefois, ces relations comportent quelques paramètres, en petit nombre il est vrai, dont la détermination ne peut être faite que par tâtonnements : il y a donc lieu de régler le modèle.

Le grand avantage du déterminisme très poussé de ce modèle par rapport à d'autres types dont le déterminisme est beaucoup plus « paramétrique », est que le réglage des quelques paramètres qu'il contient peut être géographiquement transposé, de sorte qu'on a tout intérêt à procéder à ce réglage sur un plan régional, c'est-à-dire sur plusieurs bassins à la fois.

Un exemple montrera l'efficacité de cette transposition. La rivière Sainte-Anne, au Québec, se compose de deux branches alimentées par des bassins d'égale superficie ayant le même pourcentage de surface de lacs avec toutefois une distribution géographique différente de ces lacs. Les autres caractéristiques physiographiques sont sensiblement les mêmes. Les hydrogrammes unitaires déduits des observations effectuées pour chacun de ces bassins ont des débits maximaux dans le rapport de 0,70. La simulation faite au moyen du modèle sur une averse unitaire, en prenant les mêmes valeurs des paramètres, sur les deux bassins, permet de retrouver exactement cette valeur de 0,70.

Le réglage au sens strict consiste uniquement, un algorithme de calcul ayant été choisi, à déterminer les meilleures valeurs numériques à donner aux paramètres. L'adaptation d'un modèle à un cas particulier peut entraîner en plus certaines modifications de la conception de la fonction de production, la fonction de transfert pouvant être considérée actuellement comme étant bien au point. Un cas des plus difficiles est celui d'un bassin dans lequel on a une très grande hétérogénéité de la perméabilité : la fonction de production doit alors avoir une très grande souplesse si on veut la traiter avec le même algorithme sur toute l'étendue du bassin.

7. POSSIBILITÉS ET APPLICATIONS.

On a vu que, dans ce modèle, on introduit d'une part, pour chaque élément de surface, une fonction de production de la lame écoulée, liée aux caractéristiques physiographiques locales et utilisant comme entrées les variables météorologiques transposées en s'appuyant sur les corrélations observées. D'autre part, le transfert est rendu par un processus de formation de l'écoulement d'amont en aval tenant compte du cours d'eau à l'intérieur de chaque élément. Grâce à cette dissociation des fonctions, le modèle serre au plus près la réalité et présente l'avantage non seulement d'être facilement transposable d'un bassin à un autre appartenant à une région différente, mais aussi de pouvoir tester, à l'intérieur d'un même bassin, la validité de la simulation des débits sur des sous-bassins aux caractéristiques physiographiques différentes ou opposées.

Cette séparation entre fonction de production et processus de formation de l'onde de crue permet la prise en compte de toute l'information météorologique disponible dans le temps et dans l'espace. La précision de la simulation est d'autant plus grande que l'information est plus complète.

Par ailleurs, le modèle simule les débits en tous points du bassin, ce qui permet incontestablement la vérification simultanée de sa fidélité.

Enfin, la modification naturelle ou provoquée des caractéristiques physiographiques des éléments de surface (urbanisation, défrichement), la modification du réseau de drainage (dérivations) peuvent être prises en compte. L'influence d'une régularisation programmée sur une ou plusieurs parties du bassin peut être évaluée sans difficulté.

Les applications de ce type de modèle seront très nombreuses dans bien des domaines.

Domaine technique.

— Etablir à partir des données météorologiques des séries chronologiques de débits continues ou non (études des crues, des étiages, etc.) ; on notera en particulier l'établissement de séries hydrométriques en des points dépourvus de stations, à partir de séries climatiques, observées ou simulées par des processus stochastiques, qui sont plus facilement transposables dans l'espace.

— Simuler les périodes de crues à redouter à partir des situations météorologiques exceptionnelles.

— Inciter les directions des services qui gèrent des réseaux de mesures hydrométriques à coordonner leur action à celles des autres sciences de la terre (météorologie, géomorphologie...) en leur offrant un outil de synthèse efficace, souple, réaliste et perfectible.

— Etudier les influences dues aux modifications de la gestion des retenues à buts multiples, sur le comportement d'un système hydrologique.

— Faire la prévision des débits sur les grands bassins versants.

— Simuler la qualité des eaux d'un bassin versant dans l'espace et dans le temps, sera une des applications possibles de ce modèle de transport de masse d'eau. Il suffit, en effet, de connaître le volume d'eau des lacs et réservoirs et leurs propres caractéristiques de diffusion interne, pour réaliser cette simulation. Les effets d'une injection instantanée en un point du réseau peuvent être connus dans le temps et dans l'espace en aval du bassin.

Domaine économique.

— Couplé aux modèles économiques de gestion, ces modèles fourniront les entrées hydrologiques nécessaires, déduites de simulations aléatoires des données météorologiques.

Domaine scientifique.

— Avec quelques modifications, ce modèle peut être utilisé pour simuler les écoulements verticaux de l'eau dans la zone aérée du sol et les écoulements horizontaux des nappes. La dimension de la surface élémentaire doit être alors dix ou cent fois plus petite. Le modèle devient un outil de vérification des concepts hydrologiques mis en œuvre.