

SERVICE HYDROLOGIQUE  
DE L'ORSTOM

-----  
19, Rue Eugène Carrière  
PARIS 18<sup>e</sup>  
-----

APPLICATION DU MODELE A DISCRETISATION SPATIALE AU BASSIN VERSANT  
DU VAR POUR SIMULER LES DEBITS JOURNALIERS DES ANNEES 1969 ET 1970

PAR G. GIRARD  
DIRECTEUR DE RECHERCHES A L'ORSTOM

*Divers Hydros*

30 OCT. 1974  
PARIS, le 8-1-74  
O. R. S. T. O. M.

Collection de Références  
n° B7127Hydr.

Les modèles mathématiques en hydrologie devraient être destinés dans la majorité des cas à simuler les débits des cours d'eau à partir des éléments météorologiques connus et des caractéristiques du bassin versant.

Généralement les paramètres d'un modèle sont optimisés de manière à obtenir une simulation acceptable des débits pour un bassin versant donné et si l'on change de bassin versant une nouvelle optimisation s'impose bien souvent.

Le modèle à discrétisation spatiale ou dérivé du modèle CEQUEAU mis au point au cours de la collaboration franco-québécoise en hydrologie présente sur ces derniers un avantage majeur. Pour des bassins versants situés dans une zone climatique homogène, et, dont les caractéristiques géologiques sont comparables, les coefficients introduits restent constants et l'optimisation n'est plus nécessaire ; seuls varient les paramètres déduits de ces coefficients et des caractéristiques physiographiques des éléments de surface constitutifs du bassin ; caractéristiques d'états éminemment variables d'un point à l'autre du bassin (couverture forestière, altitude, pente locale, lac, marais, etc) et situation réciproque de ces éléments.

De par sa structure, ce modèle se prête à des modifications profondes de la fonction de production ou de la fonction de fonte ou même des modifications de drainage.

L'introduction d'un phénomène connu mais jusqu'alors négligé ou d'un facteur important décelé dans une de ces fonctions ne pose aucun problème.

Du fait de l'existence d'une banque physiographique et de drainage de l'ensemble de la province le modèle CEQUEAU a donné de bons résultats sur huit bassins complexes québécois, le modèle à discrétisation spatiale dérivé a été testé sur un ensemble de bassins versants du sud de la COTE D'IVOIRE. Il convenait également de l'appliquer à des bassins versants à forte nivrosité non seulement pour tester sa validité dans d'autres régions mais aussi pour faire apprécier ses qualités de souplesse et percevoir ses défauts.

C'est ainsi que ce modèle a été appliqué à titre de recherche au bassin du Var dont le champ de variation des caractéristiques physiographiques et des variables climatologiques est très important. Ce bassin versant, d'altitude comprise entre 0 et 3 297 m, présente de nombreux sous-bassins étudiés hydrologiquement et comporte une trentaine de stations pluviométriques réparties entre les altitudes 5 m à 1 674 m ainsi qu'une dizaine de stations climatologiques sommaires.

C'est cet ensemble de considérations qui est intervenu au moment du choix du bassin versant de recherche.

Ce rapport présente l'ensemble des travaux réalisés pour établir toutes les données d'entrée, les résultats obtenus sur deux années de fonctionnement, la critique de ceux-ci et les améliorations à apporter au modèle sous forme de commentaires.

## 2. DECOUPAGE DU BASSIN ET DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES CARREAUX

L'exploitation du modèle CEQUEAU (1) au Québec à n'importe quel bassin versant de la province rendue possible grâce à l'existence de la banque de données physiographiques et de drainage de l'ensemble des 22 600 carreaux, impliquait seulement l'étude de bassins versants de plus de 2 000 km<sup>2</sup>, la banque donnant les caractéristiques pour les carreaux de 10 km de côté.

Le modèle à discrétisation spatiale (2) laisse une marge dans le choix de la dimension des carreaux élémentaires.

Pour un même bassin, si la dimension du carreau diminue, relativement le pas de temps du transfert diminuera mais l'encombrement mémoire de l'ordinateur, pour un résultat peu différent, deviendra très important.

Le relief prononcé du bassin versant du Var et l'importance de sa densité de drainage imposent un découpage très fin. Mais utiliser quelques 800 carreaux de 2 km de côté demande un très gros ordinateur (400 à 500 k) de taille mémoire et des temps de calcul excessivement long pour un résultat sensiblement meilleur seulement si les données météorologiques sont fournies à un pas de temps plus court.

Notons que pour la simulation des débits du complexe hydro-électrique de la grande Rivière (Baie James - Québec) comptant 1 700 carreaux un programme "zone" a été réalisé de manière à regrouper les carreaux par zone d'isochronisme et de réduire à 51 zones l'ensemble des 1 700 carreaux. Le modèle de simulation adapté pour ces zones appelé modèle HCO 2000 a fait l'objet d'un rapport (3).

Pour le bassin du Var la dimension du carreau retenu est de 5 km de côté, et l'on compte 140 carreaux pour l'ensemble du bassin à la mer.

Compte tenu du temps de concentration du bassin et du plus long chemin exprimé en nombre de carreaux traversés, le pas de temps de calcul sera de deux heures. Nous verrons que les données météorologiques d'entrée peuvent être fournies indifféremment au pas de temps de 24 heures ou de 2 heures.

Les cartes topographiques IGN à l'échelle  $\frac{1}{100\,000}$  référencées Q 20, Q 21, R 20 et R 21 ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques physiographiques des carreaux de 5 km de côté et les caractéristiques de drainage du bassin limité à la mer.

Les côtés des carreaux sont choisis parallèlement au parallèle 48,60 grades nord et au méridien 5,60 grades ouest.

## 2.1 Caractéristiques de drainage

Les limites du bassin versant du Var à l'exutoire naturel (embouchure), celles des sous-bassins versants principaux :

- l'ESTERON
- la VESUBIE
- la TINEE
- le CIANS
- le COULOMB
  
- le VAIRE

celles des sous-bassins notoires et enfin, celles des bassins versants jaugés découpent les 140 carreaux entiers en un certain nombre de carreaux partiels 297.

La présentation des caractéristiques de drainage est conforme à celle définie par (1). Ajoutons quelques précisions en ce qui concerne la définition de ces caractéristiques dans le cas particulier où l'on trouve, sur un même carreau entier, trois stations hydrométriques. Ce nombre de trois étant le nombre maximal possible de stations avec la présentation proposée.

En se référant au cas de figure présentée ci-dessous, le nombre de carreaux partiels contenu dans le carreau entier IJ sur lequel existent trois stations hydrométriques A, B, C est égal à 4 ayant comme superficie relative S1, S2, S3, S4 tel que  $S1 + S2 + S3 + S4 = 1,0$ .

Le drainage sera défini comme suit :

- Le carreau partiel IJ 1 se draine dans le carreau partiel IJ 3
- Le carreau partiel IJ 2 se draine dans le carreau partiel IJ 3
- Le carreau partiel IJ 3 se draine dans le carreau partiel I  
(J - 1) 1
- Le carreau partiel IJ 4 se draine dans le carreau partiel I  
(J - 1) 1

Du fait même de l'existence de deux stations hydrométriques sur le même cours d'eau et dans un même carreau entier, une certaine perturbation, d'ailleurs très mineure, sera introduite au moment du transfert dans les résultats de la simulation. Dans tous les autres cas possibles aucune perturbation n'est à craindre en définitive.

## 2.2 Caractéristiques physiographiques des carreaux entiers

Disposant seulement des cartes topographiques à l'échelle

1  
100 000

- altitude moyenne
- pente moyenne
- pourcentage de forêt
- pourcentage de lac.

Il aurait été souhaitable de posséder l'ensemble des cartes géologiques à l'échelle  $\frac{1}{80\ 000}$  pour déterminer la caractéristique géologique dominante sur chaque carreau dans le but d'améliorer la fonction de production d'eau sur chacun d'eux plus particulièrement si les données pluviométriques d'entrée avaient été introduites au pas de temps de 2 heures.

L'altitude moyenne sur un carreau entier peut se calculer par des méthodes très diverses et très nombreuses mais il suffit en réalité d'avoir un indice représentatif de l'altitude moyenne. La méthode utilisée consiste à prendre la moyenne des altitudes repérées en cinq points fixes du carré. Toute autre méthode est aussi valable. On peut envisager également d'avoir un échantillonnage de carrés sur lesquels 10 points sont repérés d'une manière aléatoire et prendre la valeur moyenne de ces dix altitudes relevées.

La pente moyenne du carreau entier a été représentée par un indice déterminé de la manière suivante : traçons 5 cercles de diamètre 10 cm centrés aux points fixes précédents et comptons le nombre maximal de lignes de niveau interceptées par un seul diamètre judicieusement orienté dans chacun des cercles.

Cet indice de pente calculé de cette manière est très largement représentatif de la pente moyenne sur le carreau.

Les calculs des pourcentages de couverture forestière et de lac ne présentent aucune difficulté majeure.

Nous n'avons pas défini la pente locale du cours d'eau principal dans le carreau bien que cette caractéristique peut présenter un certain intérêt dans le futur pour améliorer le transfert ; l'orientation générale du carreau afin de mieux saisir la variation de la fusion de la neige selon l'exposition n'a pas été également définie.

Il n'est pas nécessaire d'introduire ces paramètres ayant une réelle influence si par ailleurs certains phénomènes physiques plus importants n'ont pas été pris en compte : variabilité de l'évapotranspiration potentielle selon le développement de la végétation, de l'évapotranspiration réelle selon le type de végétation, les réserves en eau du sol selon le type de sol, la variation de la capacité de la roche souterraine magasin d'eau. Avec ce type de modèle l'introduction d'un nouveau paramètre ne pose aucun problème. Pour ce bassin du Var nous avons introduit la variation de l'évapotranspiration avec la température elle-même liée à la variation de l'altitude.

### 3. DETERMINATION DES HYDROGRAMMES UNITAIRES DES SOUS-BASSINS

Le modèle hydrologique à discrétisation spatiale présente une certaine souplesse pour de nombreuses applications. En particulier, il peut être utilisé pour déterminer les hydrogrammes unitaires des sous-bassins versants choisis. Il suffit pour cela de forcer le modèle, à un pas de temps donné, à prendre pour chacun des carreaux un apport équivalent à une lame d'eau égale à 10 mm, tous les apports antérieurs et futurs étant maintenus égaux à zéro.

Le modèle ne comporte dans ce cas que la sous-routine de transfert qui assure la formation des écoulements d'amont en aval. La sous-routine "GRAFTB" n'a d'autre action que de présenter pour les divers sous-bassins étudiés les débits moyens écoulés à chaque pas de temps (ici de 2 heures) et de tracer graphiquement les hydrogrammes unitaires résultants de cette impulsion unitaire.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques obtenues pour les bassins versants étudiés.

Ces valeurs ne sont que des ordres de grandeur car les coefficients utilisés sont ceux calés sur les bassins versants du Québec.

Il serait intéressant de pouvoir comparer ces valeurs "théoriques" aux valeurs effectivement observées. Il serait important d'obtenir soit des études hydrologiques, soit les débits horaires de certaines crues pour chacun des bassins versants afin de vérifier cette efficacité.

HYDROGRAMMES UNITAIRES DU VAR

Lr = 10 mm

Superficie des bassins en km <sup>2</sup>	Temps de montée en heures	Temps de base en heures	Q <sub>max</sub> m <sup>3</sup> /s
2 780	48	120	170
170	8	44	35
1 824	22	96	123
691	10	80	50
332	12	52	49
372	22	72	44
25	4	28	10
178	6	42	40
65	8	40	16

#### 4. PRESENTATION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES, CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES

Le modèle à discrétisation spatiale utilisé au Service Hydrologique de l'ORSTOM comporte des sous-routines de lecture des données pluviométriques journalières et des données hydrométriques journalières, données toutes deux issues des fichiers établis pour tous les pays et Etats d'Outre-Mer.

Pour appliquer ce modèle au bassin versant du Var, il était nécessaire de rechercher une grande partie de l'information de base et de modifier la présentation de celle-ci pour l'introduire dans le modèle.

##### 4.1 Données pluviométriques

L'ensemble des données pluviométriques journalières des années 1969 et 1970 ont été remises gracieusement par le Service Météorologique National sous forme de cartes perforées dans un format donné avec codification des variables.

Trente cinq stations pluviométriques qui font partie du bassin versant du Var ou qui sont situées à l'extérieur mais près des limites du bassin, ont été sélectionnées.

Ces stations fournissent l'information pluviométrique pour des altitudes comprises entre 5 m et 1 674 m d'altitude (altitude maximale du bassin 3 297 m).

A partir du fichier pluviométrique fourni par le Service Météorologique, un programme spécial transformait ce dernier en un fichier opérationnel pour le modèle.

Il est intéressant de donner quelques valeurs des précipitations pour ces deux années afin d'expliquer les résultats du chapitre 6.

Précipitation	Maximale	Minimale	lame écoulée maximale
1969	1 345 mm	705 mm	1 526 mm
1970	1 280 mm	577 mm	1 078 mm

##### 4.2 Données thermométriques

Seules les données thermométriques journalières aux stations synoptiques sous une forme compatible avec le modèle ont été fournies gracieusement par le Service Météorologique National pour les années 1969 et 1970.

Toutes les autres données thermométriques ont été obtenues de ce service sous forme de photocopies.

La constitution du fichier thermométrique a demandé un certain temps car l'application du modèle au bassin du Var étant purement une recherche personnelle, la perforation a dû être faite par moi-même à temps perdu.

A mon grand regret l'ensemble des données pluviométriques et thermométriques n'a fait l'objet d'aucun contrôle d'homogénéité.

#### 4.3 Données hydrologiques

L'ensemble des données hydrologiques relatives aux stations hydrométriques du bassin versant a été tiré des annuaires hydrologiques de l'Agence de bassin Rhône-Méditerranée-Corse pour les années 1969 et 1970. Une partie seulement des données a été perforée car elle n'intervient dans le modèle que pour juger du calage du modèle à l'échelle journalière.

Notons que les débits journaliers pour certaines stations hydrométriques sont les débits mesurés mais ne représentent absolument pas les débits naturels en l'absence de tout stockage ou écoulement d'eau.

### 5. MODIFICATIONS APPORTEES AU MODELE

Le modèle à discrétisation spatiale utilisé par le Service Hydrologique ORSTOM ne possède pas de sous-programme de calcul de la fonte de neige d'une part et d'autre part ne prend pas en compte les températures.

5.1 La sous-routine de lecture des températures journalières à un nombre de stations climatologiques différentes de celle des stations pluviométriques a été introduite. En cas d'absence de mesure de température à l'une des stations, il est convenu que la mesure faite à la station la plus proche sera affectée à cette station. Pour ce faire nous utilisons la sous-routine "Substi".

Chaque carreau entier doit être affecté à une station climatologique, le critère d'affectation étant la distance comme dans le cas des stations pluviométriques.

La température moyenne sur le carreau pour un jour donné est celle mesurée à la station climatologique affectée mais la valeur est corrigée pour tenir compte d'une variation de la température avec l'alti-

tude, le gradient thermométrique étant pris égal à 3°C pour 1 000 mètres. En utilisant la température maximale il aurait été souhaitable de déterminer pour chaque jour la loi de variation de la température maximale avec l'altitude cela à partir de neuf stations climatologiques utilisées.

La hauteur des chutes de pluies ou de neige croît avec l'altitude selon une loi régionale, approximativement la précipitation annuelle croît de 1 000 mm quand on s'élève de 1 000 m. Cette loi permet d'apprécier la valeur des précipitations pour les carreaux dont l'altitude est comprise entre 1 674 et 3 297 m. Signalons que pour le bassin la hauteur pluviométrique maximale mesurée est de 1 281 mm et que pour le bassin n° 841 la lame écoulée mesurée atteint 1 078 mm.

On voit ici toute l'importance de cette loi de l'accroissement de la précipitation avec l'altitude pour que le résultat de la simulation des débits soit acceptable.

De plus, l'utilisation du gradient thermométrique ou de toute autre méthode d'estimation de la température permet de transformer la chute de pluie au poste pluviométrique de référence d'un carreau situé en altitude en une chute de neige d'une hauteur plus importante.

Le modèle à discrétisation spatiale permet d'introduire avec une grande facilité comme on le voit l'influence des caractéristiques physiographiques sur les données météorologiques d'entrée observées en des sites différents.

5.2 Le sous-programme de fonte de neige introduit comporte une distinction entre la fonte de neige à découvert et celle sous couvert forestier. Le modèle HCO 2 000 utilise un sous-programme de fonte de neige plus élaboré pour essayer de tenir compte du phénomène de murissement du stock de neige.

Comme nous le verrons, au paragraphe suivant, la crue de fonte de neige simulée est loin d'être comparable à la crue observée. Il convient à ce stade des essais d'introduire non seulement un nouveau sous-programme de fonte mais aussi d'y ajouter de plus amples informations.

5.3 Le développement du modèle (température maximale, déficit de variation de l'air, etc) ne peut être réalisé que dans le cadre d'une recherche formelle assurant les moyens matériels nécessaires aux essais et surtout l'obtention de toute la masse d'information hydrométéorologique disponible dans tous les services.

En particulier il faut envisager d'obtenir :

- des hydrogrammes caractéristiques de crues sur tous les bassins versants étudiés
- des stocks de neige au 1er janvier de l'année sur les parties hautes du bassin (on peut les obtenir avec le modèle par simulation des données du semestre de l'année précédente)
- les données sur l'évapotranspiration réelle
- les caractéristiques du sous-sol du bassin pour évaluer la capacité de stockage de ce sous-sol, la puissance de la nappe aquifère et la perméabilité de celle-ci
- enfin les caractéristiques pédologiques pour fixer la quantité d'eau contenue dans les diverses tranches de sol.

6. LES RESULTATS SUR DEUX ANNEES DE SIMULATION ET LA CRITIQUE DE CEUX-CI

A l'échelle annuelle, pour 1969 les écoulements observés ne présentent qu'un très faible écart, ils sont par stations :

Station	BV km <sup>2</sup>	Lame observée mm	Lame calculée mm	%
841	167	1 078	965	-11
832	832	704	701	0
844	691	799	788	- 1
823	26	832	779	- 7
862	372	739	783	6
"	178	637	595	5

A l'échelle mensuelle, pour 1969 on note une mauvaise estimation initiale des réserves en eau des sous-sols et une mauvaise estimation à la période de fonte de neige :

	Station 832		Station 862	
	O	C	O	C
J	42	19	60	24
F	42	28	47	28
M	73	38	65	72
A	82	39	72	97
M	135	115	130	121
J	95	135	95	94
J	65	98	78	84
A	39	52	52	55
S	36	57	40	48

	Station 832		Station 862	
O	25	27	28	23
N	48	65	44	111
D	24	26	28	25

Si pour la station 832 on note mensuellement des valeurs assez éloignées de la valeur observée, il faut souligner qu'un minimum de données a été utilisé et qu'une amélioration notoire peut être faite avec les suggestions présentées au chapitre précédent.

A cette même station 832, les débits journaliers calculés et observés aux périodes de pointes sont :

Date	Q obs	Q cal
	en m <sup>3</sup> /s	
14- 1	65	35
24- 2	80	102
7- 5	122	131
15- 5	140	125
16- 5	135	137
23- 6	220	480 (x)
24- 6	120	510 (x)
12-11	85	150
13-12	80	174
23-11	80	94
24-11	160	138
25-11	60	96

Les deux valeurs (x) proviennent de la mauvaise estimation de ETP. En l'absence de données, ETP a été pris égal à  $0,2 * (T - 2^{\circ})$  quand cette valeur était positive. Le coefficient multiplicateur devrait être 0,3 ou 0,25. La somme de ETR a varié de 258 mm pour un point d'altitude de 1 680 m à 610 pour l'altitude 475 m.

## 7. COMMENTAIRES

En l'état actuel le modèle n'a pas atteint son optimum en raison du manque de documentation hydrologique et climatologique. Néanmoins, de nombreux indices montrent que l'on peut s'attendre à des résultats nettement plus performants sans grandes difficultés dès que l'on aura introduit les améliorations signalées aux chapitres précédents.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GIRARD (G.) ;  
CHARBONNEAU (R.) ; MORIN (G.) - Modèle Hydro-physiographique  
Symposium sur les modèles mathématiques OTTAWA Mai 1972
- [2] CHARBONNEAU (R.) ; MORIN (G.) - Modèle précipitations-débits à  
GIRARD (G.) discrétisation spatiale  
Cahier Hydrologie ORSTOM - Vol.IX  
n° 4 1972 - p.35
- [3] GIRARD (G.) - Modèle précipitations-débits à  
maille variable type HCO 2000  
Rapport interne