

# Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique

*Suggestion for a coupled model of surface and groundwater simulation on a watershed*

**E. Ledoux**

École des Mines de Paris  
Centre d'informatique  
géologique

**G. Girard**

ORSTOM  
Service hydrologique

**J.P. Villeneuve**

Université du Québec  
INRS Eau

*La société hydrotechnique de France a décerné en 1983 le Prix Henri Milon à Monsieur Emmanuel Ledoux, pour son mémoire intitulé : Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique.*

*L'article ci-après reflète l'œuvre, couronnée par le jury, qui représente une voie originale et très intéressante prenant en compte, dans une modélisation à l'échelle d'un bassin hydrologique, à la fois les phénomènes superficiels et les phénomènes souterrains avec leurs interactions.*

La grande majorité des questions qui sont posées en matière de ressource en eau concerne des systèmes hydrologiques où l'eau de surface et l'eau souterraine sont étroitement associées. En effet, pour un grand nombre de régions du globe, la conjugaison de facteurs climatiques et géologiques favorables permettent l'alimentation régulière de réservoirs souterrains à partir des précipitations, ce qui assure une disponibilité continue en eau à la fois dans les nappes et dans les rivières. Ce schéma s'applique par exemple à la France mais également à tout bassin sédimentaire en climat tempéré.

Il existe cependant des exceptions. Ainsi, en zone aride, l'irrégularité des précipitations interdit la plupart du temps une alimentation des nappes par infiltration sur des surfaces étendues et la limite à des recharges temporaires le long du lit des oueds à l'occasion des crues. La ressource en eau est dans ce cas essentiellement souterraine. A l'opposé, dans les régions telles que le Bouclier Canadien, l'absence de réservoirs aquifères profonds, la régularité des précipitations ainsi que l'enneigement contribuent à maintenir l'eau à la surface du sol; le transport étant assuré par un réseau hydrographique dense doté de très nombreux lacs. L'étude de ces cas extrêmes peut justifier l'emploi d'outils de simulation purement souterrains ou inversement purement superficiels.

Cependant, en règle générale, il apparaît qu'hydrologues et hydrogéologues doivent travailler ensemble et qu'un remède doit être apporté à ce que certains auteurs ont appelé « hydroschizophrénie ».

Cette séparation n'existe en fait qu'au niveau des méthodes car il est bien certain qu'un modélisateur des écoulements souterrains doit estimer l'alimentation des nappes qui apparaît alors comme une entrée de son modèle. De même, les modèles de bassin versant de surface pennent en compte un terme d'alimentation des nappes qui sera transformé en débit de base, mais la compatibilité des valeurs introduites pour ce terme, après calibrage du modèle, avec le comportement hydrodynamique des nappes n'est pas assurée.

Le travail qui est présenté ici, fruit d'une collaboration étroite entre le Service hydrologique de l'ORSTOM, l'Institut national de la recherche scientifique-Eau au Québec et l'École des Mines de Paris, a pour ambition de tenter de combler cette lacune qui semble ainsi exister au niveau des méthodes en proposant au modélisateur un outil capable de prendre en compte simultanément et avec un degré de conceptualisation comparable, les maillons du cycle de l'eau entre les précipitations et les débits aux exutoires.

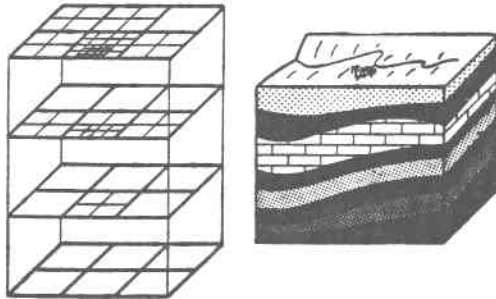


Figure 1 — Principe de la schématisation multicouche

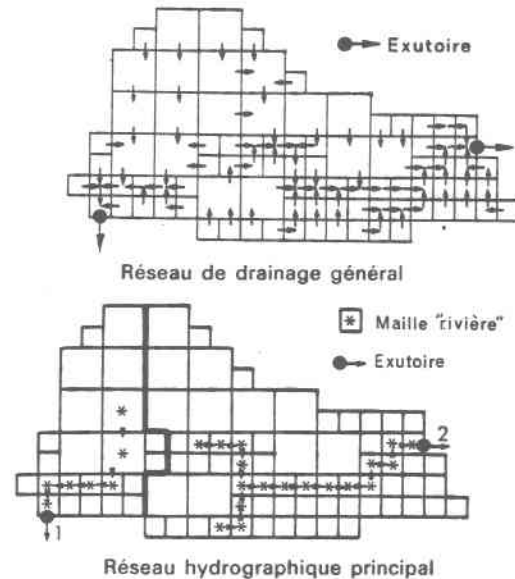


Figure 2 — Structure du réseau de drainage superficiel

L'aboutissement de ce travail se matérialise par la réalisation de programmes informatiques constituant le « modèle couplé » dont l'objectif est la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique (Ledoux, Girard, Villeneuve, 1980).

Le présent article a pour objectif de présenter selon deux parties distinctes d'une part un exposé des principes de fonctionnement du modèle, d'autre part un exemple d'application.

## 1. Principe et conception du modèle couplé

Le modèle couplé a été conçu avec le souci de parvenir à une représentation aussi phénoménologique que possible d'un système hydrologique. Ce vœu n'a pu cependant être réalisé qu'à des degrés divers. Certains mécanismes élémentaires du cycle de l'eau dont la connaissance est éprouvée de longue date, tels que ceux régissant les écoulements souterrains en milieu poreux, apparaîtront ainsi comme très détaillés. D'autres plus complexes et moins bien connus seront traités globalement par des modèles de type paramétrique; ce sera par exemple le cas des mécanismes d'infiltration dans le sol.

La caractéristique essentielle de la méthode proposée est de chercher à décomposer la chaîne des mécanismes constituant le cycle de l'eau en étapes qui seront considérées, aussi longtemps que cela sera possible, comme indépendantes, et dont les manifestations seront contrôlables séparément. De la sorte seront réunis à la fois les avantages évidents d'une simulation globale d'un système hydrologique et la faculté de vérification de la validité de certains mécanismes internes au système.

Le modèle est articulé en quatre parties principales concernant :

- l'élaboration de la structure;
- le bilan hydrique des précipitations ou production;
- le transfert dans la zone non saturée;
- enfin les transferts conjoints superficiels et souterrains.

### 1.1. Définition de la structure du système hydrologique

La représentation des écoulements au moyen du modèle couplé nécessite tout d'abord la définition de la structure du système hydrologique, issue des observations de terrain.

#### 1.1.1. Le domaine d'étude

A l'échelle régionale le domaine d'étude est la réunion d'un domaine superficiel englobant un ou plusieurs bassins versants complets ou non, et d'un domaine souterrain rassemblant des formations géologiques aquifères ayant éventuellement des relations entre elles ainsi qu'avec le domaine de surface. Un tel système est évidemment ouvert et les échanges avec le milieu extérieur sont de différentes catégories :

- échanges avec l'atmosphère;
- sorties par les exutoires superficiels;
- apports latéraux en limite du domaine de surface;
- apports latéraux en limite du domaine souterrain.

#### 1.1.2. Discretisation spatiale du domaine

La définition de la structure est fondée sur la discrétisation spatiale du domaine en éléments auxquels sont rattachées les caractéristiques physiques aussi bien superficielles que souterraines du milieu. Le mode de discrétisation adopté est une généralisation de la schématisation multicouche utilisant des mailles carrées emboîtées, devenue classique en hydrogéologie (Armisen *et al.* 1975. Ledoux, 1975, 1978).

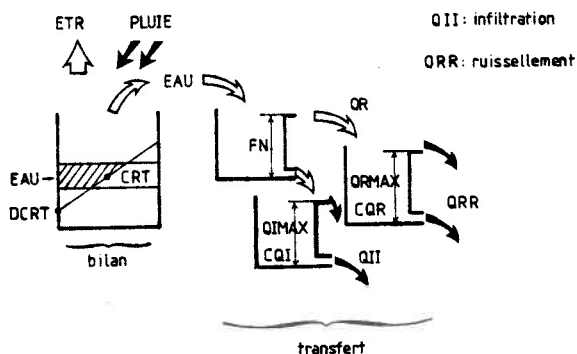


Figure 3 — Principe de fonctionnement d'une fonction-production

Le modèle couplé distingue, d'une part une couche supérieure dite de surface où s'effectue le partage de l'eau disponible en infiltration et ruissellement, ainsi que le transfert superficiel; d'autre part un nombre variable de couches profondes, sièges d'écoulements souterrains, éventuellement connectées hydrauliquement entre elles, figurant la succession verticale des niveaux aquifères telle qu'on peut la rencontrer dans les bassins sédimentaires constituant le cadre habituel des études de ressources en eau (fig. 1).

### 1.1.3. Définition du réseau de drainage superficiel

Selon la discrétisation de l'espace évoquée précédemment, le réseau de drainage de surface revêt la forme d'une ou plusieurs arborescences qui sont définies sans ambiguïté par la connaissance pour chaque maille de la surface d'une direction unique de vidange. Ce réseau de drainage est ensuite classé en deux catégories selon qu'il s'agit d'une maille appartenant au réseau hydrographique principal ou bien à la zone de ruissellement pur (fig. 2).

— *réseau hydrographique principal* : les mailles appartenant au réseau hydrographique principal sur lesquelles ont lieu les échanges à double sens avec le domaine souterrain sont appelées « mailles rivières ». A chaque exutoire de ce réseau se trouve correspondre un bassin versant du domaine superficiel représenté par un arbre d'écoulement unique, sur lesquels seront effectués ultérieurement les transferts de l'eau en rivière.

— *réseau d'écoulement de la zone de ruissellement pur* : les mailles du domaine superficiel non sélectionnées comme mailles-rivières se classent en deux catégories :

- celles qui appartiennent à une portion du réseau de drainage général dont l'exutoire ne fait pas partie du réseau hydrographique principal. Elles forment alors un ou plusieurs bassins dont les écoulements ne seront pas complètement simulés, le modèle se limitant au calcul de l'infiltration en vue de l'alimentation des nappes sous-jacentes.

- celles qui font parties du réseau de drainage général dont l'exutoire est une maille-rivière. Ces mailles constituent dans ce cas un « sous-bassin de calcul » dont l'exutoire est une maille-rivière sur lequel seront effectués les calculs de l'infiltration et du transfert jusqu'à la rivière indépendamment des écoulements souterrains.

Cette subdivision en deux types de mode de drainage est motivée par un souci d'allègement des calculs, en n'utilisant les possibilités complètes du modèle qu'aux endroits où cela est réellement nécessaire. Différentes configurations sont possibles, notamment les configurations extrêmes. Un problème où l'on ne s'intéresserait qu'à des écoulements souterrains déconnectés du réseau hydrographique ne comporterait ainsi pas de mailles rivières, seul le calcul de l'infiltration étant requis. A l'opposé, un échange nappe-rivière sur l'étendue du domaine de surface est possible en affectant l'ensemble du réseau de drainage à des mailles-rivières.

### 1.1.4. Définition des caractéristiques physiographiques

Les données physiographiques introduites sur chaque maille de la surface concernent :

- l'altitude minimale du réseau de drainage, utilisée ultérieurement pour le calcul des temps de transfert;
- la nature des sols présents sur chaque maille, exprimée en fraction de superficie occupée par chaque catégorie de sol; la distinction en catégories reposant sur la manière dont doit être effectué le bilan hydrique.

## 1.2. Calcul du bilan hydrique

Le calcul du bilan hydrique, effectué au moyen des fonctions production, a pour objectif la répartition de la lame d'eau disponible au sol entre le ruissellement, l'évaporation, l'infiltration et la quantité stockée dans le sol.

Ce calcul est mené suivant le pas de temps des données des précipitations, pour chacun des postes pluviométriques définissant une zone météorologique et pour chacune des catégories de sol introduites avec la structure.

### 1.2.1. Les zones météorologiques

Selon les disponibilités en données de précipitation, chaque maille de la surface est affectée à un poste pluviométrique définissant ainsi un certain nombre de zones météorologiques caractérisées par une lame d'eau disponible au sol à chaque pas de temps. Selon l'étendue du domaine, il peut être également nécessaire de moduler la définition de ces zones en fonction de la variabilité de l'évapotranspiration potentielle.

### 1.2.2. Les fonctions production

Chaque fonction production, correspondant à une catégorie de sol, fonctionne selon un mécanisme adapté par l'utilisateur à la nature du problème. Il est fait appel à des modèles paramétriques simples appartenant à la famille des modèles à réservoirs, car les mécanismes physiques régissant le bilan hydrique sont tellement complexes que leur prise en compte à l'échelle du domaine d'étude par un modèle phénoménologique conduirait à une trop grande lourdeur d'application. Bien que para-

métrique, il convient de noter que l'approche globale par fonction production est une approche robuste en ce sens que, tout au moins lorsqu'il s'agit de conditions d'application analogues, la transposition pure et simple des valeurs des paramètres d'une application à une autre conduit à une première évaluation satisfaisante du bilan hydrique.

La figure 3 illustre le principe de fonctionnement d'une fonction production de type standard proposée par le modèle couplé.

Le bilan hydrique est effectué dans le réservoir de bilan à chaque pas de temps en fonction de la lame d'eau précipitée  $P$ , de l'évapo-transpiration potentielle ETP et de l'état du stock en eau  $R$  du réservoir. La quantité EAU disponible pour l'écoulement est alors déterminée par deux paramètres DCRT et CRT représentant les niveaux minimal et moyen du réservoir sol. Le premier réservoir de transfert a ensuite pour tâche de répartir l'eau disponible en une lame ruisselée  $QR$  est une lame infiltrée  $QI$  en fonction d'un seuil d'infiltration  $FN$ . Deux autres réservoirs de transfert apportent éventuellement un retard à ces quantités, selon un mécanisme de vidange exponentielle avant de les introduire dans le système hydrologique.

### 1.3. Le transfert dans la zone non saturée

La quantité d'eau mise en circulation dans le système ayant été déterminée au moyen des fonctions production traduisant le comportement du sol superficiel, la zone non saturée profonde est susceptible de moduler l'infiltration, selon la profondeur de la première nappe souterraine et selon les caractéristiques hydrodynamiques du milieu qui la constitue.

Etant donné qu'il est difficile sinon impossible, de recueillir des informations à l'échelle régionale sur la

répartition verticale de la perméabilité de la zone non saturée, il est proposé d'opérer une modélisation de nature paramétrique mise en œuvre sur des zones homogènes définies à partir des mailles de la surface.

Des études portant sur la relation à l'échelle régionale (Besbes, 1978) entre l'infiltration dans le sol et l'alimentation des nappes ont montré que la fonction de transfert dans la zone non saturée pouvait être assimilée au modèle à réservoirs en cascade de Nash (fig. 4).

Un tel modèle dépend de deux paramètres : le nombre  $N$  de réservoirs reflétant l'épaisseur de la zone non saturée, supposée décomposée en  $N$  couches horizontales homogènes, la constante de temps de vidange des réservoirs caractérisant la vitesse de percolation verticale de l'eau. Bien entendu ces paramètres doivent être précisés par calibrage du modèle, notamment au moyen des historiques piézométriques.

## 1.4. Les transferts conjoints superficiels et souterrains

### 1.4.1. Le transfert souterrain

Ce transfert est basé sur l'intégration numérique de l'équation de diffusivité régissant les écoulements en milieu poreux. La schématisation multicouche adoptée distingue des niveaux dits aquifères, subhorizontaux, sièges d'écoulements en nappe, séparés par des niveaux dits semi-perméables où les circulations sont faibles mais toutefois capables d'assurer des transferts notables entre les aquifères à l'échelle régionale. Le modèle de transfert souterrain considère que les écoulements sont bidimensionnels dans les aquifères et monodimensionnels sub-verticaux dans les semi-perméables.

La traduction pour chaque maille du principe de conservation de la masse d'eau au cours du mouvement régit par la loi de Darcy en fonction de la charge moyenne

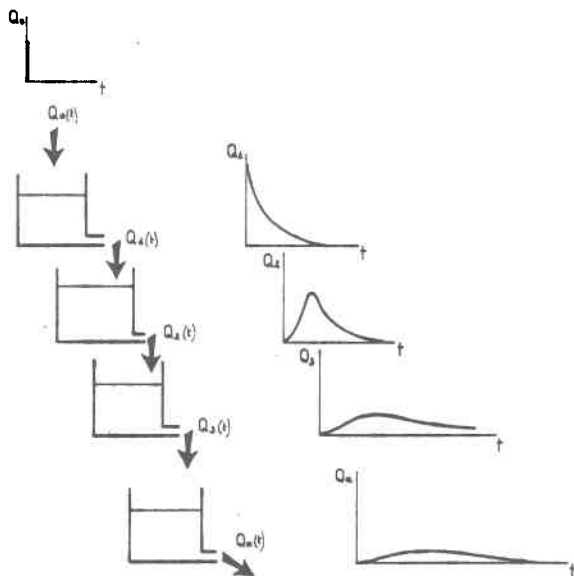


Figure 4 — Principe de modélisation du transfert dans la zone non saturée.

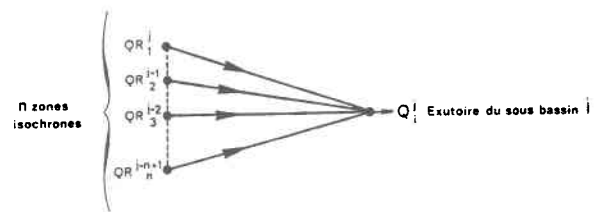


Figure 5 — Schéma du transfert sur les zones de ruissellement pur.

sur chaque maille et des valeurs discrétisées des paramètres hydrodynamiques conduit à un système d'équations différentielles du premier ordre par rapport au temps que l'on résout par une méthode itérative.

#### 1.4.2. Le transfert sur les zones de ruissellement pur

L'eau disponible pour le ruissellement à l'issue des fonctions production est acheminée à l'exutoire de chaque sous-bassin de calcul, c'est-à-dire jusqu'au réseau hydrographique principal selon un algorithme basé sur la notion d'isochronisme (fig. 5).

Le volume ruisselé  $Q_i$  au pas de temps  $j$  à l'exutoire du sous-bassin de calcul  $i$  est obtenu par la formule :

$$Q_i = \sum_{k=1}^n QR_k^{-k+1}$$

où  $QR_k^{-k+1}$  représente le volume disponible pour le ruissellement au pas de temps  $j - k + 1$  sur la zone isochrone de numéro  $k$ ,  $n$  étant le nombre total de ces zones relativement au sous-bassin de calcul considéré.

Remarquons qu'à ce niveau le transfert de l'eau est effectué globalement jusqu'à la maille rivière exutoire du sous-bassin de calcul, ce qui implique que le débit ne peut être calculé qu'à cet exutoire, à l'exclusion de tout autre point intermédiaire. De plus, le calcul considère que les écoulements en provenance des zones isochrones s'effectuent en parallèle, c'est-à-dire sans possibilité de laminage d'une crue au passage d'une zone à l'autre. Enfin l'eau ruisselant en un point du sous-bassin ne peut s'infiltrer en aval le long de son trajet vers l'exutoire. Ce cas a déjà été pris en compte au niveau des fonctions production et sera repris lors de l'écoulement en rivière.

#### 1.4.3. Le transfert dans le réseau hydrographique principal

Le transfert en rivière achemine l'eau produite par

ruissellement à l'exutoire des sous-bassins de calcul vers les exutoires des différents bassins en tenant compte des échanges nappes-rivières. L'algorithme de transfert considère le réseau hydrographique principal comme une arborescence de réservoirs ou biefs se vidant les uns dans les autres de l'amont vers l'aval suivant une loi de tarissement exponentielle.

Les biefs sont établis par regroupement des mailles-rivières offrant à l'eau la même durée de trajet jusqu'à l'exutoire, une fois effectué le choix d'un pas de temps pour le calcul, qui peut être différent du pas de temps des précipitations (fig. 6). Le transfert porte sur le stock en eau total d'un bief et non sur le stock individuel de chaque maille-rivière, il en résulte, qu'une fois le transfert réalisé, le volume dans chaque bief doit être à nouveau réparti dans les mailles le constituant en vue de l'évaluation des échanges nappes-rivières.

A l'opposé du cas de ruissellement pur, le débit peut être simulé en n'importe quel point du réseau hydrographique principal, permettant par exemple la comparaison avec les données de différentes stations hydrométriques.

#### 1.4.4. La relation nappes-rivières

Cette relation règle au niveau du réseau hydrographique principal la liaison entre le transfert souterrain et le transfert superficiel. Le couplage est effectué à chaque pas de temps entre une maille-rivière et les mailles des couches souterraines qui lui correspondent verticalement. Selon l'état hydraulique du système, deux situations sont possibles (fig. 7).

— *Situation 1* : la rivière et la nappe sont connectées hydrauliquement, la rivière imposant son niveau à la nappe moyennant une certaine perte de charge à travers son lit. Le sens de circulation de l'eau peut éventuellement varier avec le temps.

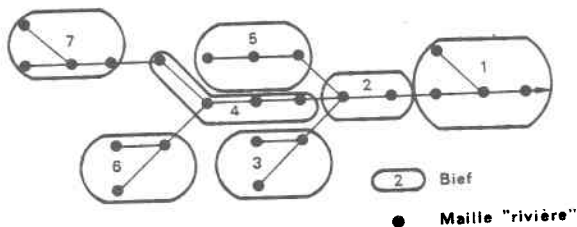


Figure 6 — Principe de constitution des « biefs » sur le réseau hydrographique principal.

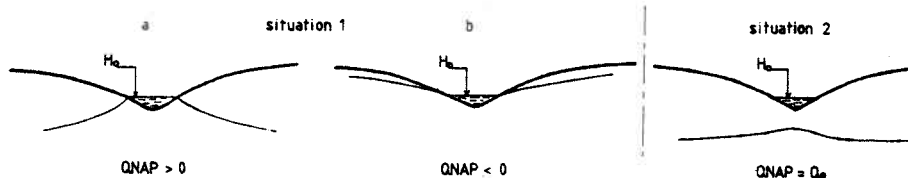


Figure 7 — Principe de la relation nappe-rivière.

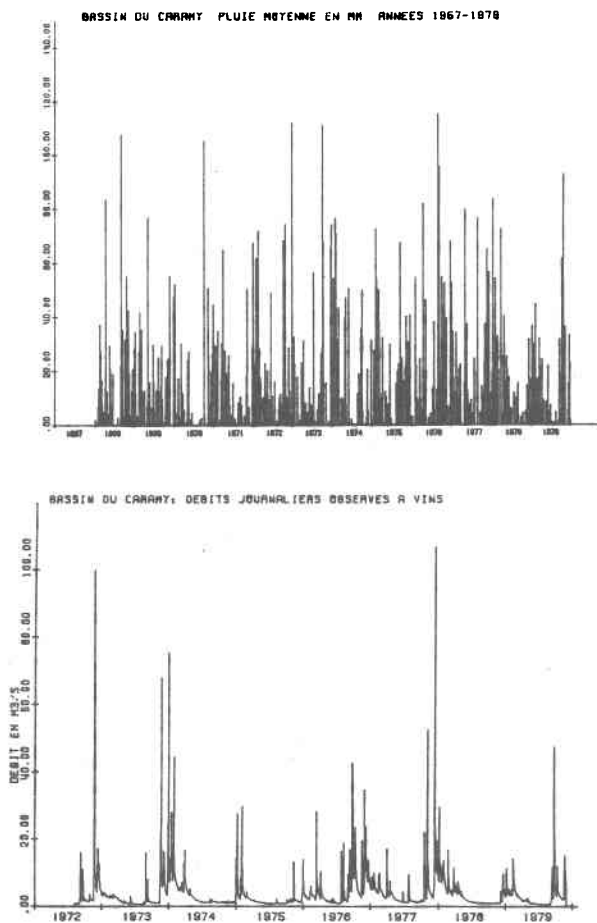


Figure 8 — Débits moyens journaliers et pluviométrie observés sur le bassin du Caramy.

— *Situation 2* : la rivière et la nappe sont déconnectées par la présence d'une zone non saturée. Le modèle considère dans ce cas que le transfert s'effectue dans le sens rivière-nappe avec une valeur donnée du débit.

Remarquons que les variations annuelles de régime hydraulique peuvent provoquer des changements de situation de la relation nappe-rivière; il est de plus nécessaire de tenir compte pour le calcul de l'infiltration de la quantité d'eau disponible en rivière. La combinaison de ces différents mécanismes aboutit à une formulation non linéaire de cette relation.

### 1.5. Architecture du modèle

Les programmes ont été conçus de façon modulaire de façon à permettre un traitement découplé des différents transferts aussi longtemps que cela est possible, ainsi qu'une adaptation aisée du modèle au problème traité.

Un premier programme (GEOCOU) concerne la définition de la structure du système qui assurera la description des caractéristiques physiques des aquifères et des caractéristiques physiographiques des bassins versants.

Un second programme (MODSUR) se charge d'établir les bilans hydriques à partir des caractéristiques de la structure et conduit à une première évaluation de l'écou-

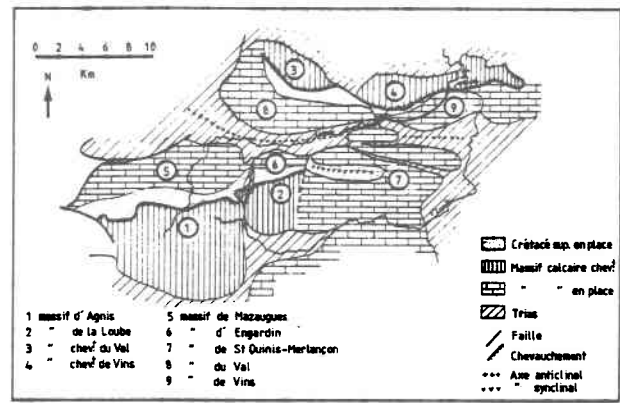


Schéma structural tectonique

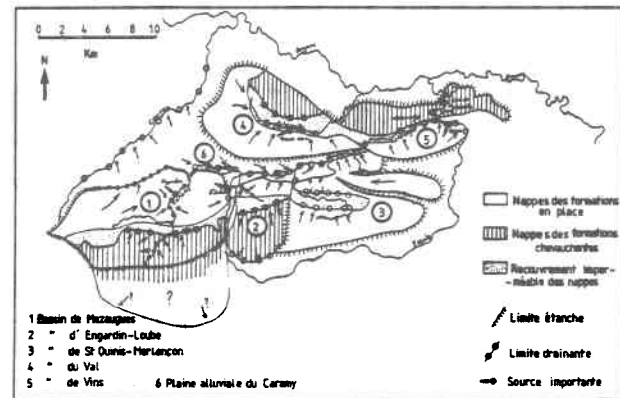


Schéma hydrogéologique

Figure 9 — Structure géologique et hydrogéologique du bassin du Caramy.

lement permettant un précalibrage du bilan hydrologique global.

Enfin le dernier programme (MODCOU) réalise la simulation conjointe des transferts superficiels et souterrains, et calcule les débits ainsi que les variations de l'état piézométrique des nappes.

## 2. Exemple d'application du modèle couplé : Le bassin du Caramy

Plusieurs applications ont été tentées sur des bassins français ou étrangers présentant une gamme de superficie de quelques dizaines d'hectares à plusieurs milliers de kilomètres carrés, ainsi qu'une large variété de structures géologiques et hydrologiques.

L'exemple du bassin du Caramy situé dans le département du Var dans le midi de la France constitue par ses caractéristiques physiographiques très hétérogènes une bonne démonstration des propriétés du modèle couplé.

Cette étude entreprise pour le compte de la Direction départementale de l'agriculture du Var a bénéficié de la participation de plusieurs organismes notamment le Ser-

vice régional d'aménagement des eaux d'Aix-en-Provence et la Compagnie Aluminium-Péchiney.

Le travail concerne une région d'environ 250 km<sup>2</sup> qui draine des reliefs relativement importants (1 000 m) et bien arrosés, jusqu'au réservoir de Carces servant à l'alimentation en eau de Toulon. Une abondante pluviométrie (moyenne supérieure à 1 000 mm sur 1968 à 1979) ainsi qu'une distribution irrégulière au cours de l'année produisent un débit de base soutenu (0,5 à 1 m<sup>3</sup>/s) et des crues parfois spectaculaires (100 m<sup>3</sup>/s) (cf. fig. 8).

L'étude lithostratigraphique conduit à distinguer deux formations aquifères principales dans le Lias inférieur et dans le Jurassique moyen et supérieur constituées de calcaires et dolomies à la fois fissurés et poreux, souvent karstifiés.

Une activité tectonique conjugant des plissements et des chevauchements d'extension E-W et des failles de direction N-S a abouti à l'organisation du domaine en six bassins hydrogéologiques relativement indépendants drainée par la rivière Caramy et quelques ruisseaux affluents (cf. fig. 9).

## 2.1. Mise en œuvre du modèle couplé

### 2.1.1. Définition de la structure

Le domaine superficiel a été décrit par 615 mailles carrées de 1 250 m, 625 m et 312,5 m de côté dont 207 mailles-rivières figurant le tracé de Caramy et de ses affluents (fig. 10).

Le bilan hydrique a été réalisé au pas de temps journalier à partir des données suivantes :

- précipitations journalières en quatre postes pluviométriques;
- évapotranspiration potentielle décadaire uniforme sur le domaine (Penman);
- cartographie des formations géologiques affleurantes.

L'emploi de 5 fonctions production a permis la distinction des :

- sols de plaine alluviale,
- sols calcaires perméables,
- sols calcaréo-dolomitiques perméables,
- sols imperméables argilo-gréseux,
- sols imperméables marno-calcaires.

Le domaine souterrain constitué de six bassins hydrogéologiques a été représenté par neuf unités aquifères éventuellement connectées les unes aux autres, discrétisées selon 1 000 mailles carrées de 1 250 m, 625 m et 312,5 m de côté (fig. 11). Les paramètres hydrodynamiques des aquifères, mesurés en de rares points, ont été déduits en première estimation d'après les résultats d'études hydrogéologiques antérieures. Leur extension au différentes mailles du domaine souterrain a fait l'objet d'un calibrage du modèle.

### 2.1.2. Calibrage du modèle

On disposait pour ce calibrage :

- de séries hydrométriques journalières en deux stations à l'amont et à l'aval du bassin sur la période 1972-1979;
- de mesures piézométriques en trois points, irrégulièrement réparties dans le temps, la plupart recueillies à l'occasion d'essais de dénoyage de travaux miniers.

Le calibrage du modèle réalisé essentiellement sur les débits en rivière, a porté sur le réglage des points suivants :

- synchronisme des crues observées et calculées, déterminé par le choix du temps de concentration du bassin;
- forme des crues dues au ruissellement, influencée par les deux paramètres du réservoir de transfert des fonctions production;
- débit de base et tarissement des nappes liés au paramètre d'infiltration des fonctions production et aux paramètres hydrodynamiques des nappes.

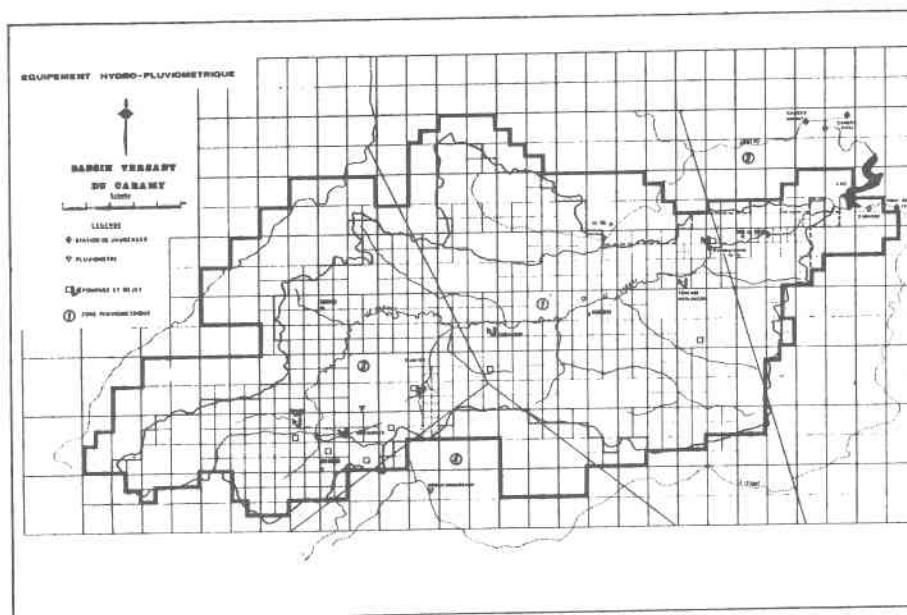


Figure 10 — Discretisation du domaine superficiel

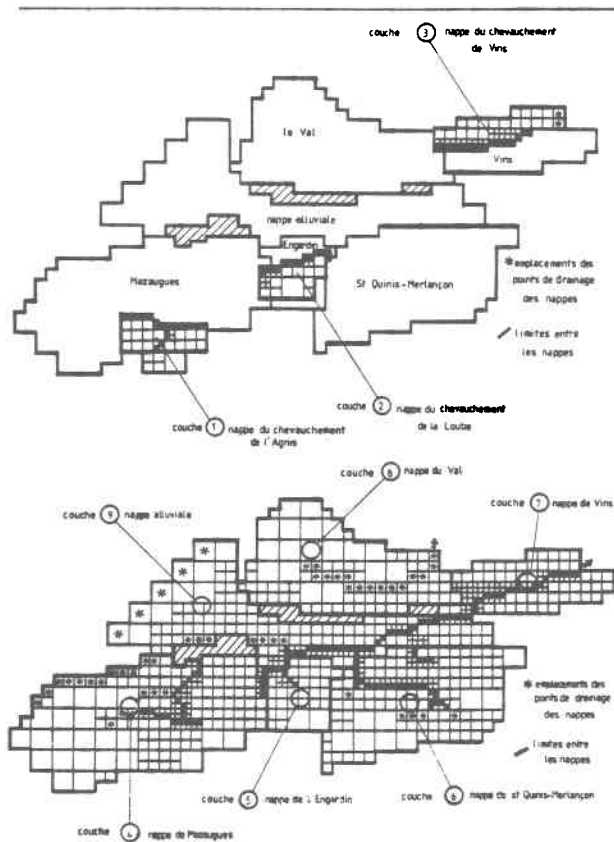


Figure 11 — Discretisation du domaine souterrain.

## 2.2. Résultats des simulations

Deux types de simulations ont été effectuées; au pas de temps décadaire en vue d'obtenir un calibrage global pluriannuel, puis au pas de temps journalier pour l'étude d'épisodes de crues particuliers.

### 2.2.1. Simulations au pas de temps décadaire

Sur l'ensemble de la période de simulation (1968-1979), les volumes écoulés annuellement aux deux stations hydrométriques se répartissent comme suit (en millions de m<sup>3</sup>) :

	Vins station aval		Caramy-Chantiers station amont	
	calculé	observé	calculé	observé
1968	72,5	—	8,4	5,14
1969	91,4	—	11,6	10,9
1970	81,8	—	9,8	8,39
1971	91,1	—	10,4	9,15
1972	14,5*	12,0*	16,8	16,0
1973	83,7	92,8	10,5	14,5
1974	159,2	157,0	16,2	23,3
1975	61,9	59,2	8,8	7,50
1976	102,6	99,8	14,1	13,1
1977	162,0	151,8	18,9	23,0
1978	168,2	163,5	15,6	20,9
1979	61,8	61,0	8,2	7,3
<b>Total de la période</b>	<b>814</b>	<b>797</b>	<b>152</b>	<b>162</b>

\* année incomplète

On constate une bonne reproduction par le modèle des volumes établis sur l'ensemble de la période. L'écart annuel relatif n'excède pas en général 10 % sauf pendant 1972 où les observations sont d'ailleurs incomplètes.

Les figures 12 et 13 montrent les variations décadaires du débit aux deux stations, ainsi que la reconstitution d'une série piézométrique influencée par une exploitation minière (fig. 14).

### 2.2.2. Simulation au pas de temps journalier

Conservant les paramètres réglés sur les simulations décadaires, on a effectué un calcul au pas de temps journalier sur la période janvier-février-mars 1978 (fig. 15). Les résultats du modèle sont en bon accord avec les observations, notamment en ce qui concerne la reproduction d'une crue exceptionnelle dépassant 100 m<sup>3</sup>/s.

Le modèle ainsi calibré a été utilisé pour la simulation et la prévision des volumes d'eau stockés dans le réservoir de Carcès, exutoire du bassin.

## 3. Conclusion sur l'emploi du modèle couplé

Les tentatives d'application du modèle couplé effectuées à ce jour permettent de dégager quelques commentaires concernant ses propriétés.

- L'adaptation à des bassins d'étendues et de caractéristiques diverses est aisée, grâce aux possibilités offertes par la discrétisation spatiale qui autorise la représentation d'hétérogénéités géologiques, physiographiques et climatiques. Le modèle s'est ainsi montré apte à simuler les écoulements sur un bassin québécois de 70 hectares occupé à 20 % par un lac (bassin du lac Laflamme), sur un bassin crayeux assez homogène de 100 km<sup>2</sup> dans le nord de la France (bassin de la Lys) ainsi que sur un bassin de 200 km<sup>2</sup> très hétérogène dans le sud (bassin du Caramy). Une tentative à caractère anecdotique a également été faite pour simuler les débits sur la France entière.
- La discrétisation spatiale facilite la transposabilité du modèle. Les termes du bilan hydrologique effectué par le modèle sont en effet fonction des paramètres physiques représentables sur la structure; or ces paramètres gardent des valeurs voisines d'un bassin à un autre si le milieu concerné est de nature comparable. Il en résulte que dans la mesure où la structure est correctement établie, le modèle doit s'adapter d'un problème à un autre avec un minimum de calibrage des paramètres. Ce problème de transposabilité des modèles à discrétisation spatiale et du « modèle couplé » en particulier fait actuellement l'objet d'une étude sur la partie française des bassins de la Meuse et la Moselle, l'objectif étant de montrer dans quelle mesure les paramètres du modèle ajustés sur la Moselle sont transposables au cas de la Meuse.
- Prenant en compte simultanément l'eau de surface et l'eau souterraine, le modèle doit être calibré à la fois sur des données de débit de sources et de cours d'eau, mais aussi sur des données piézométriques. Le modèle peut donc d'une part être plus contraint, ce qui augmente la confiance que l'on doit pouvoir lui accorder, mais il peut



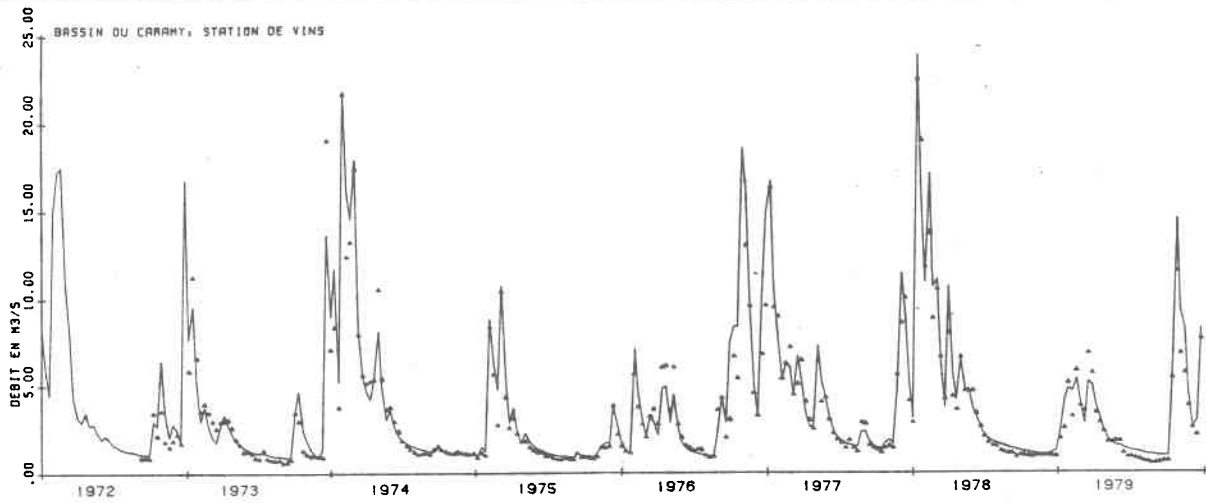


Figure 12 — Comparaison entre débit calculé (—) et débit observé ( $\Delta$ ) à la station aval.

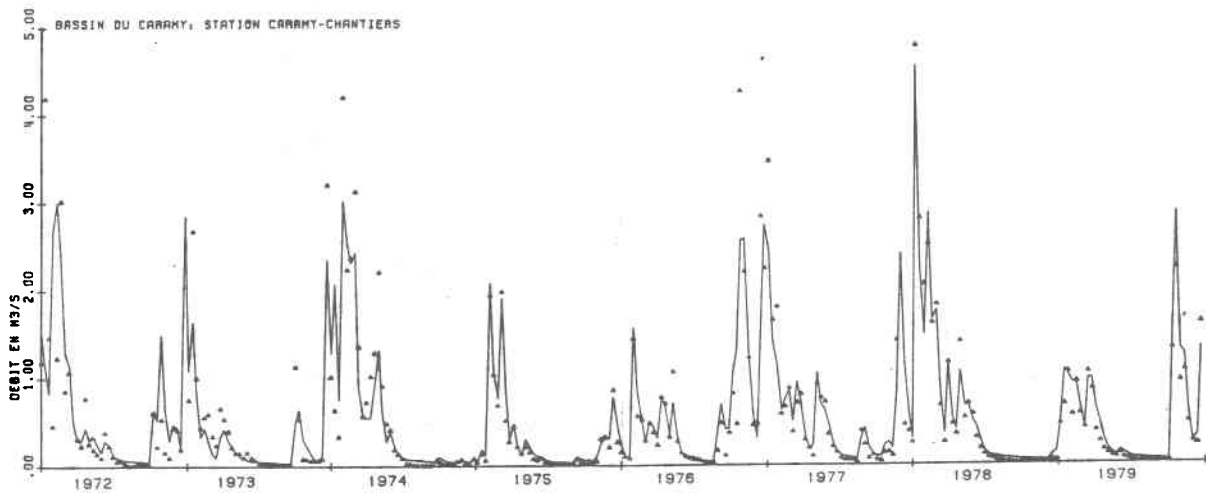


Figure 13 — Comparaison entre débit calculé (—) et débit observé ( $\Delta$ ) à la station amont.

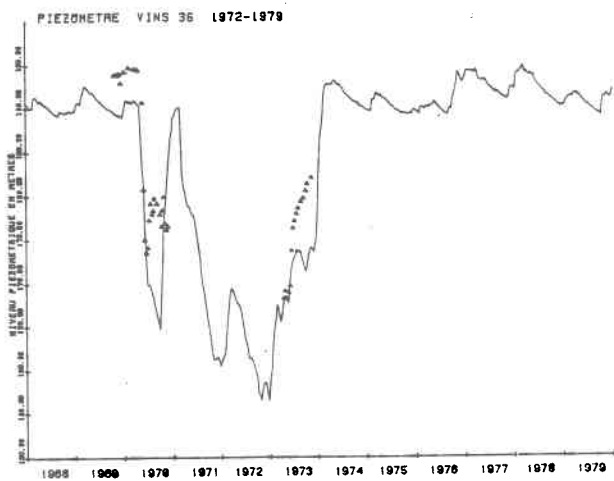


Figure 14 — Reconstitution d'un historique piézométrique.

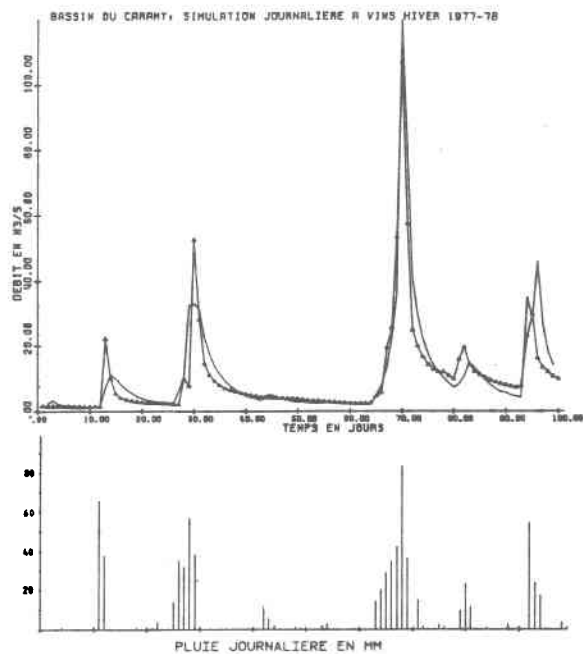


Figure 15 — Simulation du débit au pas de temps journalier à la station aval (janvier-février-mars 1978).

d'autre part utiliser un plus grand nombre de données, ce qui facilite le calibrage. En fin d'étude, on dispose d'un outil de simulation qui assure nécessairement un ensemble cohérent entre la pluie et les débits avec une possibilité de contrôle non seulement aux exutoires, mais encore en tout point du domaine selon la définition de la structure faite au moyen de la discrétisation spatiale.

Nous concluons en disant que le modèle ne doit pas être considéré comme figé. L'ensemble informatique déjà réalisé constitue une structure d'accueil pouvant recevoir

des perfectionnements nécessités par les besoins des problèmes pratiques. Il convient pour cela de multiplier les applications. Une évolution a d'ailleurs déjà été faite dans ce sens avec une amélioration du traitement de l'écoulement de surface permettant la prise en compte de systèmes complexes de barrages-réservoirs. Une application vient d'en être faite à l'ORSTOM sur un bassin brésilien. Une évolution future pourrait être l'extension du modèle au transport de matière accompagnant l'écoulement.

### Références bibliographiques

- [1] GIRARD G., MORIN G., CHARBONNEAU R. — Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, vol. IV, n° 4, 1972.
- [2] ARMISEN P., BESBES M., LEDOUX E., LEVASSOR A., MARSILY G. de, POITRINAL D. — Sammir : un programme mathématique de simulation des aquifères multicouche en mailles irrégulières. *Congrès de Porto-Alegre (Brésil)* réf. LHM/RD/75/23, 1975.
- [3] LEDOUX E. — Programme NEWSAM. *Principe et notice d'emploi*. Rapport Ecole des Mines LHM/R75/11.
- [4] MARSILY G. de, FRASNETTI J.C., LEDOUX E., TIBURTINI R., VILLENEUVE J.P. — Inventaire des ressources en eau et adéquation besoins-ressources : peut-on faire une première approche simplifiée à partir d'une modélisation complète du cycle de l'eau ? *Colloque national « Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France »*. Nice, 1977.
- [5] MARSILY G. de, LEDOUX E., LEVASSOR A., POITRINAL D., SALEM A. — Modelling of large multilayered aquifer systems : theory and applications. *Journal of Hydrology*, 36, 1978.
- [6] BESBES M. — *L'estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle régional d'infiltration efficace*. Thèse d'Etat, Université P. et M. Curie, 1978.
- [7] GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P. — Modèle intégré pluie-eau de surface-eau souterraine. *Société Hydrotechnique de France, session 114*, novembre 1979.
- [8] LEDOUX E. — *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique*. Thèse de Docteur-Ingénieur. Ecole des Mines de Paris-Université Pierre et Marie Curie. Paris, 1980.
- [9] GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P. — Le modèle couplé : simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. *Cahier ORSTOM, série Hydrologie*. vol. XVIII n° 4, 1981.
- [10] VILLENEUVE J.P., GIRARD G., LEDOUX E. — Modélisation et simulation intégrées : eau de surface-eau souterraine. *Eau du Québec*. vol. 15, n° 1, février 1982.
- [11] DESCHENES J., VILLENEUVE J.P., LEDOUX E., GIRARD G. — Modélisation intégrée des écoulements de surface et souterrain : application du modèle couplé au bassin versant du Lac Laflamme au Québec; *Bulletin du BRGM, section III* (à paraître), 1983.