

# Le modèle couplé

## Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique

G. GIRARD

ORSTOM, Service Hydrologique

E. LEDOUX

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre  
d'Informatique Géologique

J.-P. VILLENEUVE

Institut National de la Recherche Scientifique du Québec  
(INRS-Eau)

### RÉSUMÉ

*La présente publication est le fruit d'une étude entreprise en étroite collaboration entre l'Institut National de la Recherche Scientifique du Québec (INRS-EAU), l'École des Mines de Paris (CIG, Fontainebleau) et l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM).*

*Le modèle présenté ici a pour objectif la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Il s'agit d'un modèle déterministe à discrétisation spatiale dont la conception dérive d'un modèle souterrain à mailles carrées emboîtées et d'un modèle de surface à mailles carrées déjà testés séparément sur de nombreux bassins.*

*Pour schématiser le cycle de l'eau ce modèle, dit « modèle couplé », distingue cinq fonctions interconnectées.*

- *La fonction d'entrée qui constitue la source des apports en eau dans le système (précipitations sur le domaine de surface, échanges aux limites latérales des domaines superficiel et souterrain).*
- *La fonction production dont le rôle est de répartir les précipitations entre l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration et le stockage dans le sol en fonction de caractéristiques physiographiques du bassin.*
- *La fonction de transfert de surface dont l'objectif est d'acheminer par isochronisme l'eau superficielle en distinguant un domaine de ruissellement pur et un domaine d'écoulement en rivière.*
- *La fonction de transfert souterrain qui réalise l'intégration des équations de l'écoulement en milieu poreux sur un domaine multicouche.*
- *La fonction de transfert surface souterrain qui calcule les échanges réciproques entre le réseau hydrographique et les aquifères.*

*L'ensemble est articulé, dans l'état actuel, en quatre programmes écrits en langage FORTRAN, destinés à opérer séquentiellement.*

- *Le programme GEOCOU organise en fonction des données physiographiques la discrétisation spatiale du milieu superficiel souterrain, ainsi que l'arbre de drainage des bassins en surface.*
- *Le programme MODSUR évalue pour chaque maille de surface la répartition de l'eau disponible au ruissellement et à l'infiltration à partir des données météorologiques et en fonction des paramètres attribués au sol.*
- *Le programme NONSAT assure le transfert de l'infiltration nette calculée dans MODSUR en alimentation à la nappe suivant un processus uniforme par groupement de mailles constituant des zones homogènes selon les caractéristiques du milieu non saturé.*
- *Le programme MODCOU simule finalement les transferts de l'eau à la fois dans la couche de surface et dans les couches souterraines en tenant compte d'interactions à double sens entre les nappes et les rivières.*

*Trois exemples d'application sont donnés sur des bassins hydrologiques français et montrent l'aptitude du modèle à s'adapter à différents types d'écoulement et à différentes échelles de description.*

ABSTRACT : The "modèle couplé". A joint'y simulation of surface runoffs and water ground flows on a hydrological watershed.

The present paper is the result of narrow studies between the Institut National de la Recherche Scientifique of Quebec (INRS-EAU), the Ecole des Mines of Paris (CIG, Fontainebleau) and the Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM).

The purpose of the model presented here is to simulate both surface runoffs and waterground flows. It is a deterministic model with spatial discretization based upon two models already tested separately on many watersheds. The first one is a groundwater model using square mesh grids which may evolve and the second one is a surface model with square mesh grids.

To idealize the watercycle in this model, the so-called « modèle couplé », five functions are related :

- An entry function which describes all the water inflows for the system (precipitation, inflows at the lateral boundary between surface domain and groundwater domain).
- A production function to attribute the appropriate parts of precipitations to infiltration, to runoffs, to evapotranspiration and to storage as physiographical characteristics of the watershed.
- A function of surface transfer to carry the surface water by isochronism taking into account the difference between overland runoffs and river flows.
- A function of waterground transfer which integrates runoff equations in porous media on multi-layer domain.
- A function of transfer surface-underground which computes the two way exchanges between the drainage pattern and aquifer bearings.

To date, this program uses four sequential subroutines written in FORTRAN :

- The subroutine GEOCOU organizes the spatial discretization of the waterground and surface systems and the drainage pattern of surface sheds as functions of physiological data.
- The subroutine MODSUR gives for each surface mesh the available quantity of water for runoff and for infiltration, based upon meteorological data and as function of the parameters of the soil.
- The subroutine NONSAT ensures the transfer of the net infiltration computed by MODSUR to the feeding of the water table, in a uniform process for groups of meshes which have homogeneous characteristics in the unsaturated media.
- The subroutine MODCOU finally simulates both the water transfer to the surface layer and the water transfer to underground layers with consideration of interactions between the water tables and the river flows.

Examples of application are given for three river basins from France. They show the capability for this model to be adapted to different types of runoffs and different scales of basin.

## TABLE DES MATIÈRES

### Introduction

#### 1. Pourquoi un modèle couplé? — Description des objectifs de la modélisation

##### 1.1 Objectifs et méthodes d'étude des ressources en eau

###### 1.1.1 Etude d'inventaire

###### 1.1.2 Etude de modélisation

##### 1.2 Proposition d'étude par modèle couplé

###### 1.2.1 Que peut-on attendre d'un modèle appliqué à l'étude des ressources en eau

###### 1.2.2 Méthodologie d'étude au moyen du modèle couplé

###### 1.2.3 Conséquences de la méthodologie proposée

#### 2. Principe et conception du modèle couplé

##### 2.1 Description du système hydrologique

###### 2.1.1 Domaine d'étude

###### 2.1.2 Représentation du cycle de l'eau

###### 2.1.3 Organisation générale du modèle

- 2.2 Programme GEOCOU : description initiale du système
    - 2.2.1 Discrétisation spatiale
    - 2.2.2 Définition du réseau de drainage de surface
    - 2.2.3 Définition des caractéristiques physiographiques
    - 2.2.4 Synthèse des opérations réalisées au stade du programme GEOCOU
  - 2.3 Programme MODSUR : Modélisation de la fonction production
    - 2.3.1 Données météorologiques
    - 2.3.2 Calcul des fonctions-production
    - 2.3.3 Transfert de l'eau de surface sur les zones de ruissellement pur
    - 2.3.4 Transfert partiel de l'eau de surface dans le réseau hydrographique principal
    - 2.3.5 Synthèse des opérations réalisées par le programme MODSUR
  - 2.4 Programme NONSAT : Modélisation des transferts dans la zone non saturée
    - 2.4.1 Retard à l'infiltration
    - 2.4.2 Le modèle de Nash
    - 2.4.3 Mise en œuvre du modèle de Nash
  - 2.5 Programme MODCOU : Simulation conjointe des transferts de surface et des transferts souterrains
    - 2.5.1 Le transfert souterrain
    - 2.5.2 Le transfert dans les rivières
    - 2.5.3 La relation nappe-rivière
    - 2.5.4 Mise en œuvre des modèles de transfert
    - 2.5.5 Extension et limites des modèles de transfert
  - 2.6 Synthèse et conclusions
3. *Application du modèle couplé sur les bassins de la haute Lys (Pas-de-Calais) et du Caramy (Var)*
- 3.1 Le bassin de la haute Lys
    - 3.1.1 Hydrogéologie du bassin de la haute Lys
    - 3.1.2 Modélisation des écoulements
    - 3.1.3 Mise en œuvre du modèle
    - 3.1.4 Simulation d'un historique de référence
  - 3.2 Le bassin du Caramy
    - 3.2.1 Description de la structure
    - 3.2.2 Relations entre domaine de surface et domaine souterrain
    - 3.2.3 Mise en œuvre du modèle
    - 3.2.4 Calibrage du modèle
    - 3.2.5 Résultat des simulations
4. *La mise en œuvre du modèle couplé est-elle une opération lourde?*
- 4.1 Application du modèle couplé à l'échelle de la France. Description de la structure
  - 4.2 Remarques sur la schématisation adoptée
    - 4.2.1 Domaine de surface
    - 4.2.2 Domaine souterrain
    - 4.2.3 Cas particulier des nappes phréatiques
  - 4.3 Les données météorologiques
  - 4.4 Résultat des simulations
    - 4.4.1 Reconstitution des débits aux exutoires
    - 4.4.2 Test de l'influence d'une couverture forestière
5. *Conclusion*
6. *Références bibliographiques*

## INTRODUCTION

La présente publication est le fruit d'une étude entreprise en étroite collaboration entre l'Institut National de la Recherche Scientifique du Québec (INRS-EAU), l'École des Mines de Paris (CIG, Fontainebleau) et l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM) qui s'est développée au cours de la dernière décennie en trois étapes :

— une mise en commun de l'expérience acquise par l'INRS-Eau et l'ORSTOM qui a conduit à l'élaboration d'un modèle à discrétisation spatiale des écoulements superficiels sur un bassin hydrologique (modèle CEQUEAU);

— un développement au CIG de Fontainebleau d'un modèle à mailles carrées emboîtées de simulation des écoulements souterrains permanents et transitoires en aquifères multicouches (modèle NEWSAM);

— une nouvelle mise en commun, cette fois de la part des trois organismes cités, pour la création d'un modèle couplé intégré pluie-eau de surface-eau souterraine dont l'objet est la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un domaine discrétisé, union d'un sous-ensemble de bassins hydrologiques de surface et d'un sous-ensemble d'aquifères éventuellement interconnectés entre eux et avec la surface.

La synthèse du travail ainsi réalisé a donné lieu à la thèse de Docteur-Ingénieur sur la « modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique » soutenue par E. Ledoux (réf. 3bis), et dont la présente publication reprend les chapitres essentiels.

L'objectif poursuivi était justifié par les besoins croissants d'études intégrées concernant les ressources en eau d'une région et par la nécessité de procéder à une modélisation conceptuelle de la fraction du cycle de l'eau au cours de laquelle l'eau se trouve utilisable sous forme de ressource à l'intérieur du domaine. C'est à dire que cette modélisation considérera le devenir de l'eau entre le moment où cette eau arrive au sol sous l'aspect de précipitations et le moment où elle atteint les exutoires du domaine suite aux divers modes de transfert et de stockage pouvant exister dans les sols et en surface.

Cette publication comporte quatre parties :

— La première partie est consacrée à la description des objectifs du modèle couplé et aux contraintes de son emploi.

— La seconde partie expose les principes du modèle en décrivant la manière dont les différentes étapes du devenir de l'eau seront schématisées à l'heure actuelle.

— La troisième partie montre, par le biais de l'application à deux sous-bassins hydrologiques français la souplesse d'emploi du modèle et son aptitude à rendre compte de la description détaillée du cycle de l'eau à l'échelle régionale.

— La quatrième partie tente de montrer la facilité de mise en œuvre de ce modèle couplé par une schématisation presque caricaturale des ressources en eau de la France entière et présente la faculté qu'a ce modèle de s'adapter à différentes échelles.

## 1. POURQUOI UN MODÈLE COUPLÉ ? DESCRIPTION DES OBJECTIFS ET DES CONTRAINTES DE LA MODÉLISATION

Sur le plan théorique, l'utilité d'une modélisation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains est évidente. Comment serait-il possible en effet de séparer deux maillons contigus du cycle de l'eau constituant à eux seuls la quasi-totalité des ressources en eau exploitables, en dehors, bien entendu, du stockage direct des eaux pluviales?

Hydrologues et hydrogéologues ont cependant pendant de nombreuses années travaillé distinctement en considérant, suivant le cas, le domaine superficiel ou le domaine souterrain comme une condition à la limite que l'on s'efforçait de traiter de manière globale en évitant toute description phénoménologique trop complexe.

Cette attitude séparatiste entre l'étude des eaux de surface et celle des eaux souterraines trouve sa justification dans l'observation même des phénomènes. Les hydrologues chargés de la mesure des écoulements de surface se sont préoccupés de la connaissance de phénomènes rapidement variables tels que les crues; tandis que les hydrogéologues s'intéressaient, eux, à des phénomènes à temps de réponse beaucoup plus lents impliquant des variations temporelles faibles devant l'importance du stock. Les uns et les autres en sont néanmoins venus à un rapprochement à mesure que la nécessité d'une quantification précise de la ressource se faisait sentir.

De plus, comme chacun des modes de transfert présents à l'intérieur d'un bassin a déjà fait l'objet de nombreuses études ayant conduit à des modélisations partielles plus ou moins sophistiquées, il convenait de créer un modèle intégrant l'ensemble de ceux-ci ainsi que le mode de production le plus validé actuellement. Ceci afin de

pouvoir assurer d'une part un contrôle efficace des termes de ce bilan et des échanges et, d'autre part, de répondre aux besoins de fournir une méthodologie d'étude complète des systèmes hydrauliques au niveau de la ressource en eau et des implications dues à l'exploitation de ces ressources.

Le modèle couplé intégrant l'eau de surface, l'eau souterraine et leurs interconnexions a donc ainsi l'ambition d'apporter un élément de réponse aux questions posées par les problèmes régionaux de modélisation des systèmes hydrauliques.

Afin de mieux comprendre quelles pourraient être les implications et les contraintes d'un tel outil, nous allons nous interroger quelque peu sur les méthodes d'étude régionale des ressources en eau, d'autant plus que le développement régional et la poursuite continue des objectifs de qualité amènent, à l'heure actuelle, à repenser les moyens mis en œuvre pour juger de l'adéquation besoins-ressources.

## 1.1. OBJECTIFS ET MÉTHODES D'ÉTUDE DES RESSOURCES EN EAU

L'étude des ressources en eau d'une région a pour objectif général la quantification des écoulements pouvant exister sur les différents bassins hydrologiques constituant cette région. Cette quantification est effectuée dans un triple but :

- d'aménagement qui découle directement de l'estimation des ressources en eau d'une région, et cela en permettant de proposer différentes solutions capables d'utiliser au mieux cette ressource tout en palliant les carences éventuelles dans le futur ;
- de prévision dont le rôle est d'estimer quelle pourrait être l'évolution à divers horizons d'un système hydraulique soumis à une perturbation vraisemblable et ayant fait, ou non, l'objet d'aménagements successifs donnés. Cette attitude peut inclure la reconstitution de l'état naturel de la ressource en dehors de tout aménagement, à partir d'informations indépendantes telles que la pluviométrie ;
- enfin de gestion qui est la recherche du choix d'un aménagement optimal, compte-tenu d'un ou plusieurs critères donnés.

Ces objectifs sont atteints à divers degrés à l'heure actuelle, à partir de deux catégories d'études assez disjointes :

- les inventaires à dominante descriptive,
- les modélisations de systèmes hydrologiques particuliers.

Ces deux types d'études sont souvent menés séparément à des périodes différentes, et par des hommes de formations distinctes. Le premier de ces types doit défricher le terrain et fournir des informations brutes. Il peut aussi présenter des données élaborées pour quantifier la ressource naturelle. Le second type d'étude est considéré comme l'aboutissement et la synthèse des reconnaissances menées sur le terrain et n'est souvent entrepris qu'après de nombreuses années de mise en œuvre des études d'inventaire.

Devant ce constat, nous pensons à l'opposé que ces deux catégories d'études doivent être bénéfiquement réunies pour peu que l'on puisse disposer d'outils généraux permettant une modélisation graduelle donnant la possibilité d'embrasser un niveau croissant de complexité dans la connaissance des ressources hydrauliques d'une région. C'est en grande partie cette volonté de rapprochement entre la description et la simulation qui nous a guidés dans la réalisation du modèle couplé.

Afin de mieux appréhender les conditions que devrait remplir un tel modèle, nous présenterons tout d'abord les caractéristiques des études d'inventaire d'une part et, d'autre part, celles des études de modélisation.

### 1.1.1. Etude d'inventaire

L'inventaire distingue les eaux de surface et les eaux souterraines.

#### 1.1.1.1. Eau de surface

- récolte des données pluviométriques et climatologiques sur les stations météorologiques situées à l'intérieur de la région étudiée et dans son voisinage immédiat ;
- récolte des données hydrologiques aux stations hydrométriques sur de nombreux cours d'eau (hauteurs et débits) ;

- homogénéisation, interpolation et extrapolation des données recueillies. Il faut entendre par là toute méthode, le plus souvent à caractère statistique, susceptible de mettre en évidence les incohérences parmi ces données, et d'étendre l'information aussi bien dans l'espace que dans le temps, avec une possibilité d'occurrence ou une fourchette d'estimation ; encore faut-il que cette information porte essentiellement sur une période exempte de tout aménagement hydraulique modifiant les conditions naturelles ;
- bilan eau pour contrôle dans l'espace et le temps, bien souvent à l'échelle annuelle ou mensuelle ;
- inventaire des sites envisageables pour un aménagement tels que l'équipement hydroélectrique, barrage-réservoir, traitements de berges, etc.

#### 1.1.1.2. Eau souterraine

- localisation et description dans l'espace des différents réservoirs aquifères reconnus ;
- jaugeages aux exutoires apparents des nappes, inventaire des points d'eau, captages, forages et volume des prélèvements ;
- tentative d'établissement de bilan grossier permettant une première appréciation de la cohérence entre l'inventaire de surface et l'inventaire souterrain pour aboutir à l'estimation des volumes moyens exploitables compatibles avec la recharge.

Au terme de cette étude d'inventaire de la ressource naturelle, on peut utilement comparer les résultats obtenus à une estimation des besoins établis à la même échelle, et proposer, dans une seconde étape, un ou plusieurs aménagements capables d'assurer une correcte adéquation des besoins-ressources.

Cependant, compte-tenu des influences humaines au niveau de la production des eaux d'écoulement (déboisement, urbanisation, ...) et au niveau du transfert de ces eaux (retenue d'eau, captage pour irrigation, ...) qui introduisent des hétérogénéités dans les séries de données obtenues lors de l'inventaire, il est indispensable que l'inventaire comporte également la chronologie et l'historique de toutes les interventions ayant pu modifier le cycle de l'eau, mais aussi les règles de gestion et d'utilisation effective de l'eau.

#### 1.1.2. Etude de modélisation

Cette catégorie d'étude intervient à un stade ultérieur à la précédente, car elle utilise les données recueillies au cours de l'inventaire. Elle demande le rassemblement de toute l'information concernant la caractérisation des domaines de la surface et du souterrain sur toute l'étendue de la région étudiée.

Le calage du modèle portera presque exclusivement sur la chronologie des débits mesurés en un ou plusieurs points des bassins de surface (émergence des sources, stations hydrologiques) et du niveau piézométrique en un certain nombre de sites de chacun des aquifères de la zone d'étude.

L'étude considèrera notamment :

- la variabilité spatiale et temporelle des précipitations permettant le calcul des lames d'eau disponibles qui représentent évidemment la composante fondamentale du modèle,
- le comportement spatial de la tranche superficielle du sol dont le rôle assure la répartition entre l'infiltration, la rétention, l'évapotranspiration de la couverture végétale et le ruissellement de la lame d'eau arrivant au sol (pluie et/ou fonte des neiges),
- les différents modes de transfert de l'eau à la surface du sol, par ruissellement pur d'une part, et dans le réseau hydrographique entrecoupé ou non par des lacs ou retenues d'autre part,
- les différents modes de transfert de l'eau dans les nappes aquifères selon les diverses couches réservoir et leur extension spatiale.

#### 1.2. PROPOSITION D'ÉTUDE PAR MODÈLE COUPLÉ

Nous voudrions montrer à présent qu'il est possible de concilier inventaire et modélisation, et que loin de constituer un compromis, cette attitude est en réalité une méthodologie fructueuse d'estimation de la ressource en eau.

Cet objectif, que nous voudrions atteindre au moyen du modèle couplé, amène à s'interroger sur trois points:

- ce qu'il est possible d'attendre d'un modèle,
- les qualités que doit posséder un modèle pour remplir sa mission,
- la méthodologie d'emploi du modèle couplé.

### 1.2.1. Que peut-on attendre d'un modèle appliqué à l'étude des ressources en eau?

Un modèle, quel que soit son domaine d'utilisation, apporte son concours à trois niveaux qui interviennent successivement au cours du déroulement d'une étude.

1.2.1.1. Tout d'abord, le modèle permet de réaliser la meilleure synthèse des informations quantitatives et même qualitatives sur l'ensemble du bassin. Cette synthèse assure la cohérence des données et la critique des valeurs numériques. En cela, le modèle est au premier chef un outil d'inventaire. Ceci peut se manifester de plusieurs façons.

Parmi les différentes interprétations que l'homme de terrain peut faire des mécanismes physiques observés et présents sur le bassin, certaines sont compatibles entre elles, d'autres ne le sont pas. Le modèle, en dégagant les contradictions, assurera la cohérence de la description des différents maillons du système. Nous pouvons rapporter ici une expérience anecdotique à ce sujet. S'agissant de l'étude d'un aquifère dolomitique du Jurassique supérieur dans le Midi de la France, le modèle mathématique d'écoulement construit à cette occasion se trouvait dans l'incapacité de rendre compte du débit d'étiage d'une source importante utilisée pour l'alimentation en eau d'une ville voisine. Après de nombreux essais destinés à tester différentes hypothèses de fonctionnement, et restés infructueux, il apparut à la suite d'une visite sur le terrain que le débit de la source était artificiellement soutenu à partir d'une prise d'eau en rivière. Cette aventure apporte une certaine confiance quant à la représentativité globale du modèle.

Dans un autre ordre d'idée, le modèle procure souvent une certaine confirmation quantitative d'une information qualitative. Ainsi, à titre d'exemple, au cours d'une étude réalisée sur les nappes du Continental Terminal du Sahara septentrional dans la vallée de l'Oued R'hir, fort peu de renseignements précis étaient disponibles sur la transmissivité des aquifères. Les données étaient en effet concentrées sur les zones de production ignorant, en particulier, totalement la région du Grand Erg au Sud, qui devait cependant constituer l'essentiel de la réserve d'eau. Seuls quelques forages ayant traversé la formation avaient permis de constater une augmentation de la granulométrie des matériaux détritiques. Au cours du calage du modèle, il est apparu nécessaire d'augmenter la transmissivité dans cette région, ce qui fut fait avec d'autant plus de confiance que cela confirmait une observation qualitative.

Concernant l'hydrologie de surface, le modèle constitue le meilleur moyen de comparer les mesures de débit sur un bassin et les mesures des précipitations. On mettra ainsi en évidence une foule d'anomalies qui seraient sans cela passées inaperçues. Sur le bassin du Caramy, qui nous servira plus loin d'exemple d'application, on constate des effets de groupage et de décalage sur les précipitations journalières, l'existence insolite d'une crue injustifiée à notre station hydrométrique. Sur ce même bassin, on a également fait ressortir une non-représentativité des précipitations sur la partie située en altitude d'un sous-bassin.

1.2.1.2. En second lieu et à un stade un peu plus avancé, le modèle permet une étude de sensibilité. Une telle application comporte deux objectifs :

- parmi les mécanismes physiques responsables du comportement du système, dégager ceux dont l'importance est prépondérante, et, par suite, ceux qu'il convient d'étudier plus particulièrement ;
- apprécier la variabilité de la réponse du système aux variations des paramètres et en déduire une estimation de la confiance qu'il est possible d'accorder aux résultats du modèle.

Cet aspect de l'étude ne nécessite pas encore un calage fin du modèle, et peut donc être entrepris très tôt dès que l'étude d'inventaire aura permis de choisir une ou plusieurs hypothèses de fonctionnement du système.

Pour servir d'exemple à ce type d'utilisation du modèle en hydrologie, nous citerons le cas de l'étude de faisabilité du barrage-réservoir d'Origny Ste Benoite sur le cours de l'Oise dans le bassin de la Seine. La retenue du barrage devant se situer en terrain crayeux possédant au moins localement une très bonne transmissivité de l'ordre de  $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ , il y avait lieu de penser a priori que les fuites à travers la nappe pouvaient être importantes. Dans le but d'apprécier ces fuites, une étude de la variabilité de la transmissivité de la nappe de la craie fut tout d'abord entreprise. Pour cela, on rechercha, au moyen d'une méthode inverse, la répartition des transmissivités correspondant à plusieurs cartes piézométriques possibles obtenues par la géostatistique à partir des observations de terrain. Le modèle de simulation des écoulements dans la nappe de la craie sous l'effet de la mise en eau de la retenue montra alors que quelle que soit la distribution des transmissivités retenue, l'importance des fuites dépassait la limite admissible. Il résulta de cette constatation que la craie ne pouvait en aucun cas constituer le facteur limitant des pertes, il fallait envisager un traitement du fond de la retenue dont différentes réalisations furent ensuite étudiées au moyen du modèle. Cet exemple nous paraît mettre en évidence comment un modèle peut, en faisant ressortir de manière quantitative un mécanisme prépondérant, avoir une influence sur l'évolution des études de terrain.

1.2.1.3. En troisième lieu, et lorsque cela est possible, le modèle doit permettre une simulation précise du comportement du système hydraulique. Cette étape constitue le niveau le plus avancé de l'étude. Il faut, en effet, être capable de procéder à un calage fin du modèle et, pour cela, disposer d'un historique suffisamment long d'obser-

vations caractérisant le système, telles que débits aux exutoires et en différents points, niveaux piézométriques, répartition spatiale et temporelle de la pluviométrie, évapotranspiration potentielle, pompages et rejets, historique des aménagements, etc. On tirera alors, comme nous l'avons déjà dit, de l'emploi d'un modèle ainsi ajusté, un quadruple avantage :

- possibilité d'engendrer les sorties du système lorsque seules les entrées auront été observées et d'accroître ainsi l'information,
- possibilité d'évaluer quantitativement l'impact d'un aménagement modifiant l'état du système,
- possibilité de rechercher un aménagement optimal en incluant le modèle de simulation dans un système d'outils d'aide à la décision.
- possibilité d'obtenir indirectement un inventaire des bassins naturels en dehors de tout aménagement.

### 1.2.2. Méthodologie d'étude au moyen du modèle couplé

Nous voudrions à présent proposer une méthodologie d'étude conciliant, à notre avis, les différents points précédents, et basée sur l'utilisation du modèle couplé.

Le modèle couplé considère un système hydrologique dont les entrées sont les précipitations sous forme de pluie et, le cas échéant, de neige, et dont les sorties sont les débits aux différents exutoires ; il doit donc prendre en compte les maillons principaux du cycle de l'eau, à savoir l'eau de surface d'une part et ses échanges avec le milieu atmosphérique et le milieu souterrain, et l'eau souterraine d'autre part. Un tel modèle regroupe ainsi l'essentiel de la ressource en eau exploitable et son emploi comportera trois phases :

- l'analyse des précipitations,
- la caractérisation physique du système hydrologique et sa discrétisation,
- la modélisation simultanée des différents transferts.

Les deux premières phases correspondent de manière plus poussée au travail réalisé pendant l'étude d'inventaire. La troisième phase considère plus particulièrement la modélisation.

#### 1.2.2.1 Analyse des précipitations

Les données concernant les précipitations conditionnent l'ensemble des ressources en eau de manière évidente. Il est donc fondamental d'en tirer le meilleur parti possible.

Ces données étant, tout au moins en quantité, relativement faciles à obtenir, même les régions les plus désertées sur le plan des études d'inventaire auront fait le plus souvent l'objet de mesures des précipitations. On disposera ainsi fréquemment d'historiques en un certain nombre de points du bassin, au pas de temps journalier. La disponibilité de telles données justifie ainsi qu'on les considère a priori comme les entrées du modèle couplé.

L'objectif que nous nous fixons sera tout d'abord d'évaluer en tout point du système, et pour chaque pas de temps, la lame d'eau tombée. L'analyse pourra suivre les étapes suivantes plus ou moins détaillées suivant le nombre de points d'observation et la longueur des historiques :

- critiques initiales des données pour rechercher erreurs et incohérences. Nous pensons ici aux techniques permettant par exemple l'homogénéisation des séries pluviométriques mensuelles, puis journalières.
- constitution pour les besoins de l'étape suivante d'un fichier décrivant les mesures en chaque poste d'observation sur la totalité de l'historique. Cette étape peut nécessiter la reconstitution de données manquantes ou leur restructuration. On pourra opérer par exemple des regroupements de la lame d'eau en certaines stations en s'appuyant sur des observations voisines, même situées en dehors du bassin.
- étude de la variabilité spatiale des précipitations en vue de leur interpolation ou de leur extrapolation en tout point du domaine. Il sera mis en évidence à cette occasion la dérive éventuelle due à l'influence du relief ainsi que la variabilité causée par les différents types de temps. L'outil d'interpolation pourra alors, suivant les résultats de l'étude de variabilité, être basé sur des considérations purement géométriques (polygone de Thiessen) ou faire intervenir des méthodes plus sophistiquées telles que la géostatistique capable de prendre en compte les corrélations spatiales des pluies, accompagnées, si l'information est en quantité suffisante, de tendances régionales telles que la dérive orographique.

Le résultat de cette analyse sera double :

- répondre tout d'abord à l'objectif initial qui était de fournir une estimation dans l'espace et dans le temps de l'eau disponible ;
- juger de la qualité de la connaissance de la lame d'eau tombée et proposer les points de mesure les mieux placés pour renforcer le réseau, ou le cas échéant, l'amélioration de l'observation des points existants.

L'analyse qui vient d'être succinctement décrite ne sera pas considérée comme faisant partie de la mise en œuvre du modèle couplé proprement dit. Nous supposons donc ce problème résolu par une méthode quelconque et considérons que nous avons à notre disposition l'historique complet des précipitations en un certain nombre de stations. Il va sans dire que les résultats de la modélisation amèneront sans doute à reconsidérer l'analyse des précipitations, puisqu'un des services que pourra rendre le modèle sera de mettre en évidence au cours du calage les incohérences entre entrées et sorties non encore détectées.

#### 1.2.2.2. Caractérisation du système hydrologique et discrétisation

C'est une démarche classique et satisfaisante pour l'esprit que de vouloir ramener la connaissance des caractéristiques d'un système à celles d'un certain nombre de cellules de base qualifiées de zones homogènes élémentaires. On propose ainsi souvent en hydrologie de surface le sous-bassin ou encore les zones isochrones regroupant les points du bassin à partir desquels la durée du transfert de l'eau jusqu'à l'exutoire est identique. Cette façon de procéder présente l'inconvénient de lier d'emblée la caractérisation du bassin aux mécanismes de transfert, ce qui peut n'avoir aucune raison d'être et, de plus, nuire aux simulations futures des conséquences des aménagements qui amènent une modification de ces mécanismes.

Nous proposerons donc un découpage de l'espace systématique en mailles carrées sur lesquelles seront discrétisées les caractéristiques physiographiques tant superficielles que souterraines.

Une telle approche a été mise au point par la collaboration INRS-Eau-ORSTOM pour le domaine superficiel sous l'aspect du « modèle physiographique à discrétisation spatiale », dénommé CEQUEAU (réf. 2).

Cette même approche est des plus classiques en hydrogéologie où une discrétisation de ce type est depuis longtemps adoptée, en particulier à l'École des Mines de Paris, pour la résolution numérique des équations de l'écoulement en milieu poreux (réf. 1 et 6).

Dans le domaine de surface, la discrétisation spatiale autorise l'utilisation systématique et indépendante des transferts de l'ensemble des paramètres qui conditionnent l'évapotranspiration, le stockage de l'eau dans le sol, le ruissellement et l'infiltration. Parmi ces paramètres, nous citerons :

- nature du couvert végétal,
- nature du sol,
- présence de plans d'eau libre, lacs, marais, retenues,
- pente et exposition,
- altitude,
- température de l'air, de la surface du sol,
- prélèvements et apports, gestion des retenues,
- etc.

L'ensemble de ces données provient de l'exploitation de cartes géographiques, de cartes géologiques, de photos aériennes ou d'images obtenues par satellite, documents existant le plus souvent indépendamment de l'étude hydrologique, sauf en ce qui concerne les mouvements des eaux dans les retenues ou les bassins.

Dans le domaine souterrain, la discrétisation spatiale autorisera la caractérisation :

- de l'extension des divers réservoirs et de leurs conditions aux limites,
- des niveaux piézométriques des nappes,
- des paramètres hydrodynamiques,
- des apports et prélèvements.

La plupart de ces données seront spécifiques de l'étude hydraulique et risqueront donc d'évoluer au cours du travail de modélisation. Ceci est un autre avantage de la discrétisation spatiale qui est apte à prendre en compte toute donnée supplémentaire intervenant par la suite.

#### 1.2.2.3. Modélisation des transferts

A partir de la caractérisation précédente, le modèle couplé considèrera trois mécanismes constituant le cycle de l'eau dans notre domaine superficiel et souterrain (cf. Fig. 1).

En premier plan, le mécanisme dit de production, qui sera décrit par la « fonction production », dont le rôle est d'évaluer la répartition de la lame d'eau tombée au sol entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration et stockage dans le sol. Au même titre que l'analyse des précipitations, ce mécanisme qui conditionne la quantité d'eau qui parviendra finalement aux exutoires est primordial. Il convient donc qu'il repose sur le maximum d'hypothèses théoriques justifiées et que sa mise en œuvre ne comporte ainsi que peu de paramètres à ajuster très simplement au cours du calage.

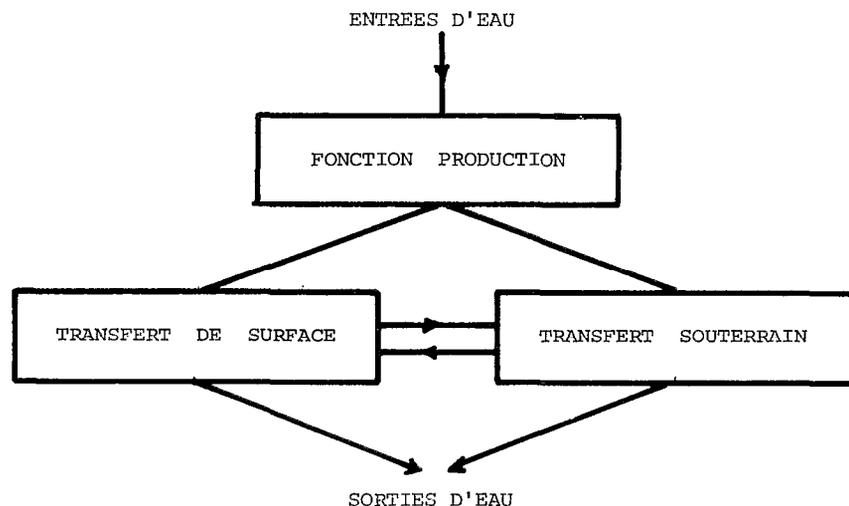


Fig. 1. — Schéma général du modèle couplé

En second lieu, vient le transfert de l'eau dans le domaine de surface conditionné par la topographie, par le réseau hydrographique et par les prélèvements ou apports.

Enfin, le transfert souterrain sera effectué sur les éléments discrets du domaine avec une sophistication plus ou moins poussée suivant les caractères reconnus des aquifères.

### 1.2.3. Conséquences de la méthodologie proposée

La méthodologie proposée fondée sur l'emploi du modèle couplé présente, à notre avis, un certain nombre d'avantages pour peu qu'il soit tenu compte de quelques contraintes au cours de la construction du modèle.

Tout d'abord, le modèle couplé considère en bloc la totalité du cycle de l'eau concernant la ressource hydraulique. Son emploi garantit donc la cohérence de la description des transferts depuis la lame d'eau précipitée jusqu'à la lame d'eau écoulée, et ceci aussi bien dans l'espace que dans le temps. Il en résulte d'une part une plus grande confiance accordée aux résultats des simulations et, d'autre part, une meilleure appréciation de la ressource en eau à l'échelle du bassin. De plus, le modèle couplé assure la compatibilité absolue entre l'eau disponible pour l'écoulement de surface et l'eau disponible pour l'écoulement souterrain. Ce partage n'est en effet effectué qu'une fois, alors qu'il devrait l'être à deux reprises sans qu'il y ait nécessairement coordination dans le cas de la modélisation séparée des domaines de surface et souterrain.

Le modèle couplé est phénoménologique. Etant basé sur la représentation de mécanismes physiques du transfert de l'eau à travers les différents domaines constituant le bassin, les paramètres du modèle sont l'expression de grandeurs physiques sinon directement mesurables, tout au moins liées de près à des phénomènes mesurables. Ceci aura pour conséquence la transposabilité du modèle d'un bassin à l'autre, cette transposabilité signifiant l'aptitude du modèle à représenter le comportement de différents bassins moyennant le seul changement de la valeur numérique des paramètres. Cet aspect est déjà bien connu des modèles utilisés en hydrogéologie, employés avec succès dans de très nombreux cas. L'efficacité de l'approche phénoménologique a également été mise en évidence en hydrologie de surface lors de l'emploi du modèle CEQUEAU sur la simulation des débits de l'Orne, en France, pendant l'année 1967 (réf. 3). La Fig. 2 montre le résultat d'une simulation obtenue sans aucun calage en utilisant simplement les données issues de la banque physiographique et en transposant à l'Orne les paramètres de calage ajustés sur le bassin de la rivière Harricana, au Québec. Le résultat obtenu montre la robustesse d'une telle approche bien que le modèle utilisé à l'époque ne prit pas en compte de manière phénoménologique, comme le modèle couplé le fera, les écoulements souterrains. La Fig. 3 montre le résultat de la simulation après ajustement des paramètres de calage de la fonction production du modèle.

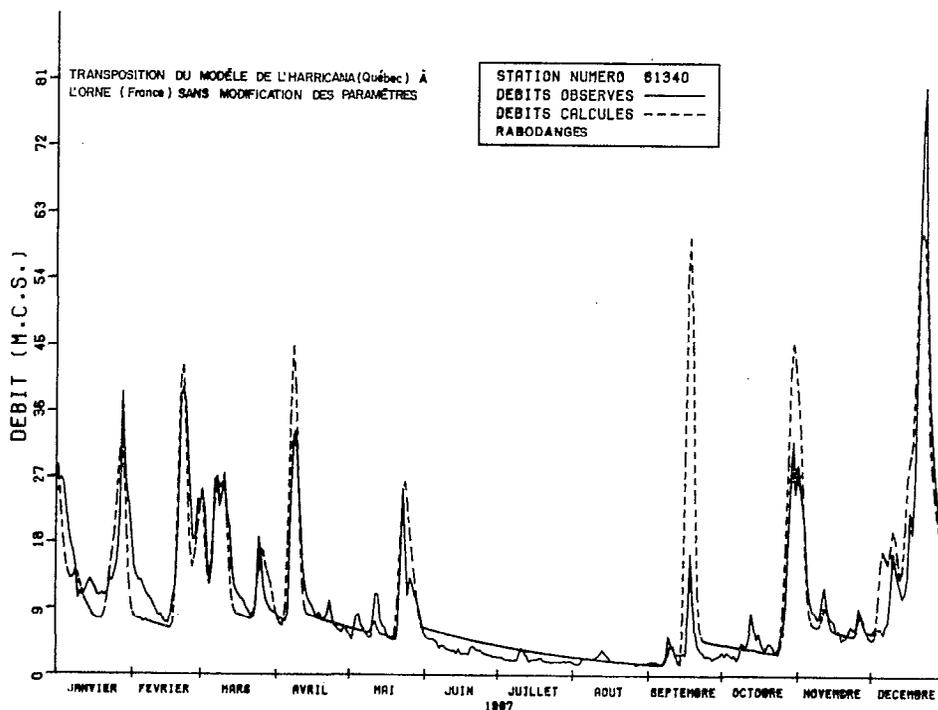


Fig. 2. — Débits observés et débits calculés (modèle Cequeau) sur le bassin versant de l'Orne (France) avec les paramètres ayant servi au bassin de l'Harricana (Québec)

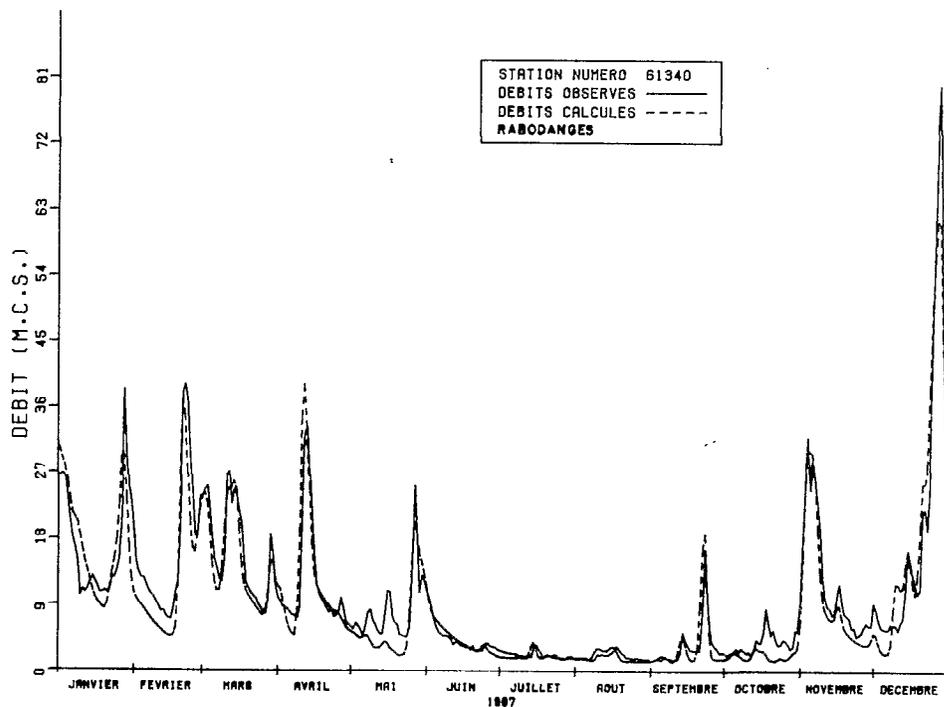


Fig. 3. — Débits observés et débits calculés sur le bassin versant de l'Orne après calage du modèle (Figures établies d'après la Réf. 3)

Le modèle couplé est évolutif. C'est une conséquence de la discrétisation spatiale qui permet de modifier à tout moment et en tout point les paramètres du système, qu'il s'agisse du calage ou bien de la simulation de l'effet d'un aménagement. Cet aspect permet une grande souplesse d'emploi en autorisant l'accueil de données nouvelles intervenant en cours d'étude. Il est ainsi possible de commencer très tôt la modélisation, même lorsque l'inventaire est encore succinct et de s'adapter par la suite aux nouveaux besoins de la description et de la simulation.

L'objectif ambitieux que se fixe le modèle couplé impose cependant un certain nombre de contraintes de réalisation et d'emploi.

Le caractère phénoménologique de la modélisation garantit une certaine généralité dans l'utilisation du modèle. Il faut cependant rester modeste et garder présent à l'esprit que la complexité du problème ne permet pas, sous peine de lourdeur compromettant l'emploi pratique du modèle, d'assurer une représentation parfaite dans tous les cas des mécanismes. Ceci nous semble particulièrement vrai pour la fonction production, comme on le verra par la suite. L'utilisateur devra donc pouvoir agir facilement sur cette fonction production pour l'adapter aux besoins propres de son bassin. Nous pensons, en particulier, que ce problème se fera sentir en fonction de l'échelle de l'étude. C'est pourquoi au cours de la réalisation pratique du modèle, nous nous attacherons à rendre accessibles au maximum les modules du programme ayant trait à la fonction production.

La discrétisation spatiale contribue grandement à la robustesse et à la souplesse d'emploi du modèle. Il y a cependant une contrepartie qui est la multiplication de l'information à manipuler provoquant une augmentation qui peut devenir très importante de la puissance des moyens informatiques nécessaires. Cet aspect négatif est limité par la capacité d'évolution du modèle qui permet de n'utiliser, à chaque étape de l'étude, que le niveau de discrétisation nécessaire. Il n'en reste pas moins que le modèle couplé, ainsi que d'ailleurs tous les modèles à discrétisation spatiale, demeure un outil dont l'utilisation ne peut être raisonnablement envisagée que si l'on dispose des moyens de l'informatique moderne.

Ayant défini les objectifs que notre méthodologie se propose d'atteindre, nous allons maintenant décrire les principes qui ont présidé à l'élaboration du modèle couplé.

## 2. PRINCIPE ET CONCEPTION DU MODÈLE COUPLÉ

Le propos de cette seconde partie est de présenter une description des principes de base ayant présidé à la construction du modèle couplé. Cette description comprend d'une part la caractérisation du système hydraulique modélisé et les mécanismes physiques qui y régissent le mouvement de l'eau et, d'autre part, l'énoncé des schémas représentatifs adoptés qui constituent la modélisation proprement dite.

Nous aborderons donc successivement la description du domaine modélisé, l'organisation générale du modèle, et finalement l'élaboration détaillée des différents schémas que comprend le modèle.

### 2.1. DESCRIPTION DU SYSTÈME HYDROLOGIQUE

Comme on le verra par la suite, le modèle couplé a été réalisé avec le souci constant de parvenir à une représentation aussi phénoménologique que possible d'un système hydrologique. Ce vœu n'a pu cependant être pleinement réalisé. En effet, certains aspects du cycle de l'eau seront ainsi très détaillés et feront intervenir des mécanismes élémentaires dont l'universalité est éprouvée de longue date à l'occasion d'applications pratiques. C'est le cas des écoulements souterrains pour lesquels la mécanique des fluides en milieu poreux donne le plus souvent toute satisfaction. En d'autres occasions, les mécanismes élémentaires sont mal connus, ou bien encore tellement complexes, qu'une approche phénoménologique complète conduirait à une lourdeur incompatible avec l'objectif pragmatique que nous nous sommes fixé. C'est, parmi d'autres, le cas des transferts de l'eau dans le sol entre sa surface et la nappe. Nous opterons alors pour une schématisation plus globale se rapprochant d'une représentation paramétrique. On s'efforcera cependant de limiter le nombre de ces paramètres et de leur conserver une signification physique les reliant si possible à des caractéristiques mesurables du système.

#### 2.1.1. *Domaine d'étude*

Avant de tenter une quelconque modélisation, il convient de définir le domaine de travail ainsi que ses limites. C'est souvent un problème délicat en matière de ressources en eau. En effet, l'étendue de la région où l'on envisage d'utiliser cette ressource est presque toujours beaucoup plus restreinte que l'étendue du système hydraulique

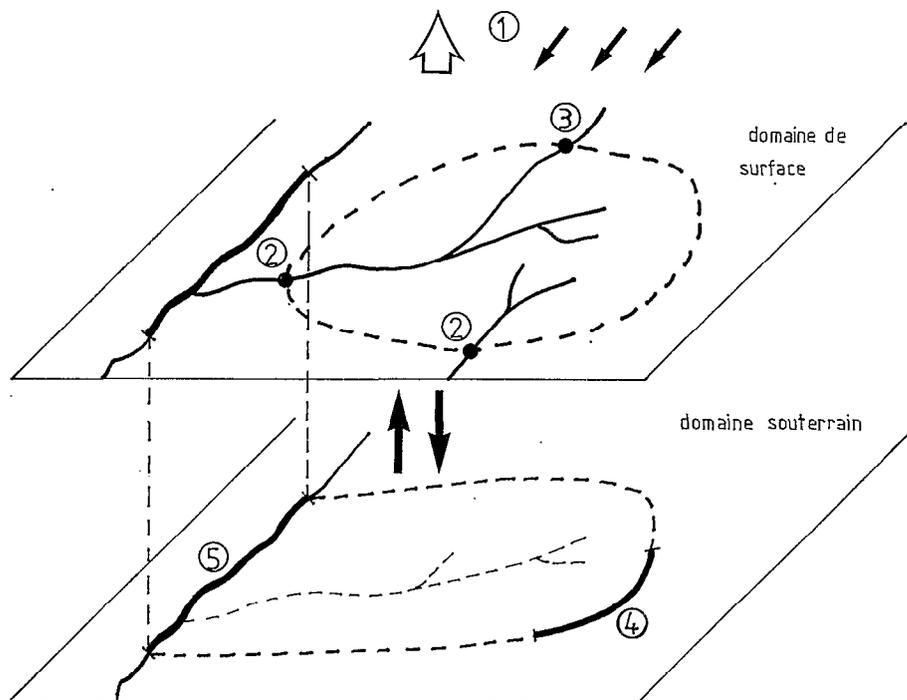
naturel dont dépend cette ressource. Il en résulte que les investigations auraient tendance à être concentrées sur les futures zones d'exploitation au détriment des autres secteurs, si bien que le modélisateur devra se contenter bien souvent de renseignements peu précis, ou même seulement d'hypothèses sur une part importante de son domaine d'action. Cette disparité dans la connaissance du domaine d'étude trouvera donc avantage à pouvoir être prise en compte par le modèle.

Nous nous placerons à l'échelle régionale, et considérerons un système hydrologique très général, constitué par un domaine de surface regroupant un ou plusieurs bassins non nécessairement complets et par un domaine souterrain rassemblant des formations géologiques aquifères ayant des relations entre elles ainsi qu'avec le domaine de surface.

Nous nous proposons de schématiser les aspects dominants du transfert de l'eau à travers un tel système, le modèle couplé proprement dit intervenant lors de la liaison entre domaine de surface et domaine souterrain.

Un tel système n'est évidemment pas fermé, et les échanges avec le milieu extérieur appartiennent à plusieurs catégories schématisées sur la Fig. 4 :

- échange avec l'atmosphère : cet échange est la résultante des précipitations parvenant au sol sur toute l'étendue du domaine de surface, et de l'évapotranspiration. Il constitue le plus souvent dans notre cas l'apport essentiel en eau au système ;
- sorties par les exutoires du domaine de surface : il s'agit des exutoires des différents bassins de surface concernés par le domaine modélisé.
- apports latéraux en limites du domaine de surface : nous plaçons dans cette catégorie l'eau en provenance des bassins superficiels situés en amont du domaine d'étude, et dont les exutoires débouchent par conséquent en bordure de ce domaine ;
- échanges en limites des aquifères : il s'agit, dans cette catégorie, des limites du domaine souterrain n'appartenant pas au domaine modélisé. Ces limites traduisent tantôt les relations avec des aquifères externes, tantôt les liaisons avec le domaine de surface hors modèle.



- |  |   |
|--|---|
| ① Echanges avec l'atmosphère             | ④ Echanges entre aquifères                                    |
| ② Exutoires du domaine de surface        | ⑤ Echanges entre aquifères et domaine de surface non modélisé |
| ③ Apports latéraux au domaine de surface |   |

Fig. 4. — Schématisation des relations du modèle avec le milieu extérieur

Cette définition très générale du domaine d'étude permet de s'adapter au mieux au problème posé, n'importe quelle portion d'un système hydrologique pouvant ainsi être traitée par le modèle, dans la mesure où l'on sait y définir en tout point les conditions aux limites.

### 2.1.2. Représentation du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, image des transferts sur un système hydrologique tel que celui qui a été choisi, met en œuvre de très nombreux mécanismes complexes. La modélisation que nous en proposons ne doit être considérée que comme une schématisation possible, dont la validité pourra être justifiée, d'une part globalement par l'aptitude du modèle à rendre compte de la relation pluie-débit, d'autre part localement par les bases théoriques sur lesquelles repose, si possible, la représentation des différents maillons du cycle.

Pour schématiser le cycle de l'eau, le modèle distinguera cinq fonctions interconnectées :

- la fonction d'entrée,
- la fonction production,
- la fonction de transfert de surface,
- la fonction de transfert souterrain,
- la fonction d'échange surface-souterrain.

#### 2.1.2.1. La fonction d'entrée

Cette fonction constitue la source des apports d'eau dans le système. Elle prend en compte essentiellement les précipitations sur le domaine de surface, mais également les échanges à travers les autres limites du système aussi bien en profondeur qu'en surface, dont nous avons admis l'éventuelle existence en toute généralité.

La modélisation de la fonction d'entrée ne sera pas abordée au cours de notre travail, et seul le résultat en sera considéré comme une donnée du problème.

Les précipitations parvenues au sol, liquides et éventuellement solides, seront supposées connues avec un certain pas de temps et une certaine variabilité spatiale. L'analyse de cette variabilité aura été préalablement faite par toute méthode appropriée et formulée sous la forme d'un découpage discret du domaine de surface en zones de précipitations uniformes. Ces zones homogènes pourront être, par exemple, les polygones affectés à chaque poste pluviométrique selon la méthode de Thiessen, ou bien le résultat d'un krigeage (réf. 6).

#### 2.1.2.2. La fonction production

Cette fonction dont le rôle est la répartition de l'entrée représentée par les précipitations entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration et stockage dans le sol, est le maillon dominant du modèle. Elle figure les mécanismes présents à la surface du sol et dans sa tranche superficielle. C'est en effet grâce à elle que s'effectue non seulement par le biais de l'évaporation le réglage de la quantité globale d'eau qui parviendra finalement aux exutoires, mais encore le choix entre le transfert par le domaine de surface et le transfert par le domaine souterrain.

L'étude du mouvement de l'eau dans la tranche superficielle du sol montre que c'est à ce niveau du cycle de l'eau que se situent les problèmes théoriques essentiels. Les mécanismes élémentaires qui s'en dégagent sont nombreux et complexes et sont régis par des paramètres souvent délicats, sinon impossibles à acquérir à l'échelle régionale qui nous préoccupe. C'est pourquoi nous avons préféré, pour la modélisation de la fonction production, une approche plus globale telle que celle qu'utilisent classiquement les modèles à réservoirs (réf. 5, 9, 9 bis, 24).

Toutefois, pour élargir les possibilités d'emploi du modèle couplé, la fonction production sera engagée dans un module, facile d'accès au sein du programme et pourra donc être adaptée éventuellement à un problème particulier par l'utilisateur.

Cette relative facilité d'accès suppose cependant que les deux maillons, fonction de transfert de surface et fonction de transfert souterrain, n'influent pas sur la fonction production, c'est-à-dire que l'on puisse décider de la répartition des disponibilités en eau avant d'en effectuer le transfert. Cette hypothèse est certainement fautive au niveau des mécanismes élémentaires. La profondeur de la nappe influe sur l'infiltration ; l'évapotranspiration est modifiée si la nappe vient à déborder. L'évaporation varie également avec la surface libre des plans d'eau. Ces exemples parmi d'autres sont destinés à montrer qu'il serait rigoureusement nécessaire de prendre en compte des interactions à double sens entre les différentes fonctions. Ceci ne sera effectivement fait, comme on le verra par la suite, qu'en certains points particuliers du système figurant les cours d'eau principaux.

### 2.1.2.3. La fonction de transfert de surface

Cette fonction a pour rôle d'acheminer à travers le domaine de surface l'eau disponible. Cette eau possède à ce niveau deux origines : il s'agit premièrement de l'eau issue de la fonction production destinée au ruissellement et, en second lieu, de l'eau échangée dans l'un ou l'autre sens avec le domaine souterrain. Il apparaît ici une nécessité d'interaction avec la fonction de transfert souterrain, nécessité qui justifie d'ailleurs l'appellation « modèle couplé ».

Toujours dans un but de simplification d'emploi du modèle, nous scinderons le domaine de surface en deux parties possédant chacune sa fonction de transfert.

La première partie considère les zones de ruissellement pur pour lesquelles les échanges avec le milieu souterrain ne peuvent être que descendants et sont réglés par la fonction production. Sur ces zones, le transfert de surface est supposé indépendant de l'écoulement souterrain et peut donc être effectué séparément. Il s'agira généralement des parties amont du système éloignées des cours d'eau pérennes.

La seconde partie concerne les zones d'échanges réciproques entre surface et souterrain telles que celles constituées par les plans d'eau importants et le réseau hydrographique principal. Le transfert devra y être effectué en même temps que le transfert souterrain.

### 2.1.2.4. La fonction de transfert du souterrain

Cette fonction simule le mouvement de l'eau dans les aquifères suivant les lois de l'écoulement en milieu poreux. Cette eau provient de l'infiltration déterminée à l'aide de la fonction production d'une part, et des échanges réciproques avec le réseau hydrographique principal évoqués au paragraphe précédent.

### 2.1.2.5. La fonction d'échange surface-souterrain

Cette fonction calcule la relation à double sens entre le domaine de surface et le domaine souterrain en des points privilégiés figurant les zones d'échanges entre les aquifères et le réseau hydrographique principal. Ce calcul doit donc être mené en simultanéité avec celui du transfert souterrain et du transfert de surface.

Le fait qu'il ne soit entrepris que sur une portion restreinte du système n'a pour but que l'allègement du modèle et ne constitue nullement une contrainte. Il est, en effet, toujours possible d'affecter la totalité du domaine de surface au réseau hydrographique principal.

## 2.1.3. Organisation générale du modèle

Ainsi que nous l'avons suggéré dans la schématisation du cycle de l'eau qui vient d'être décrite, la caractéristique essentielle du modèle couplé est de chercher à décomposer la chaîne des mécanismes constituant le cycle de l'eau en étapes qui seront considérées comme indépendantes et dont les manifestations seront contrôlables séparément. Seront donc de la sorte 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.

A cette fin, l'ensemble du modèle est articulé en quatre programmes de calcul écrits en langage FORTRAN et destinés à opérer séquentiellement :

2.1.3.1. Le programme GEOCOU (*géométrie du modèle couplé*) se charge d'une façon générale de la définition des caractéristiques géométriques et physiographiques du domaine modélisé, à savoir :

- discrétisation spatiale du domaine souterrain,
- discrétisation spatiale du domaine de surface,
- définition de l'arbre d'écoulement du domaine de surface,
- distinction à l'intérieur du domaine de surface entre zones de ruissellement pur et zones figurant le réseau hydrographique principal,
- attribution des caractéristiques physiographiques à chaque élément discret du domaine de surface.

2.1.3.2. Le programme MODSUR (*modélisation des transferts de surface*) est centré sur la modélisation de la fonction production. Il évalue, dans ce but, en fonction du temps et pour chaque élément discret du domaine de surface la répartition de l'eau disponible en ruissellement et en infiltration. En effectuant de plus un transfert provisoire de la seule eau de ruissellement dans le réseau hydrographique principal, il permet une première approche de l'ajustement du modèle.

2.1.3.3. Le programme NONSAT (modélisation de l'influence de la zone *non saturée*) assure le transfert de l'infiltration calculée par le programme MODSUR en alimentation parvenant à la nappe suivant un processus regroupant les éléments discrets du domaine de surface en zone présentant des caractéristiques uniformes vis-à-vis de ce transfert.

2.1.3.4. Enfin le programme MODCOU (*modélisation couplée* des transferts de surface et des transferts souterrains) simule finalement le devenir de l'eau disponible simultanément à travers le domaine de surface et le domaine souterrain, en tenant compte de leur interaction régie par la fonction d'échange surface-souterrain.

Nous allons à présent préciser les différentes fonctions opérées par chacun de ces programmes.

## 2.2. PROGRAMME GEOCOU : DESCRIPTION INITIALE DU SYSTÈME

Comme cela a déjà été dit, la modélisation du système hydrologique qui nous occupe est fondée sur la discrétisation spatiale du domaine à laquelle sera rapporté l'ensemble des caractéristiques physiques aussi bien du milieu souterrain que du milieu superficiel.

### 2.2.1. Discrétisation spatiale

La discrétisation spatiale du modèle couplé est héritée de celle pratiquée par le modèle de simulation des écoulements souterrains en système multicouche mis au point au Centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris, dénommé NEWSAM (réf. 14).

Le mode de discrétisation adopté est ainsi une généralisation de la schématisation multicouche devenue classique en hydrogéologie. Le modèle couplé distingue d'une part une couche supérieure dite de surface où s'effectuera le partage de l'eau disponible en infiltration et ruissellement, puis le transfert superficiel ; et 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. 5). Chacune de ces couches est ensuite découpée en mailles carrées emboîtées de dimensions variables, constituant les éléments discrets qui serviront de référence à la description du système.

#### 2.2.1.1. Définition du maillage

Dans chacune des couches ainsi définies, la discrétisation initiale est constituée par un réseau de mailles carrées de côté  $8a$ , disposées de façon à épouser au mieux les contours respectifs des couches.

Localement, ce maillage peut être subdivisé en sous-maillages de côté  $4a$ ,  $2a$  ou  $a$ . La discrétisation de certains secteurs des aquifères et du domaine de surface peut ainsi être raffinée selon les besoins, puisque l'on dispose de quatre tailles de mailles.

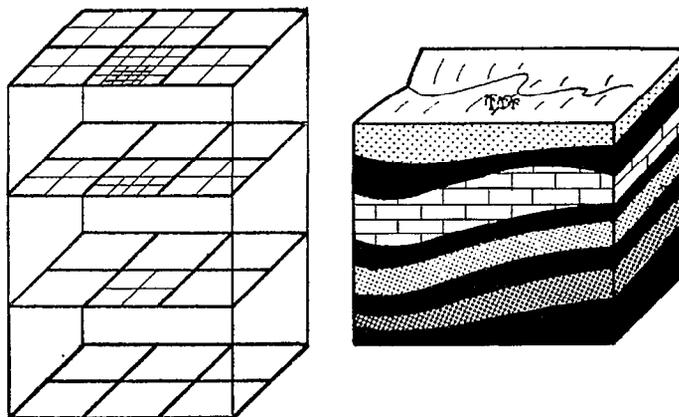


Fig. 5. — Principe de la schématisation multicouche

Cette faculté permet une appréciable diminution du nombre total des mailles en limitant la finesse du réseau aux seuls endroits nécessaires, tout en permettant au moyen d'une discrétisation plus lâche d'atteindre des limites hydrauliques pouvant être situées à des distances grandes devant l'extension des zones d'intérêt. En outre, la méthode numérique de résolution des équations du transfert discrétisées sur un tel type de maillage sera à l'abri d'un certain nombre de problèmes qui risquent de se manifester sur des découpages irréguliers.

Afin de les identifier, les mailles sont ensuite numérotées en séquence, indépendamment de leur taille et en commençant à 1 pour chacune des couches. Le repérage des numéros voisins de chaque maille est assuré automatiquement à l'intérieur de chaque couche et d'une couche à l'autre à partir de données décrivant la position de chaque maille dans la discrétisation initiale.

#### 2.2.1.2. Contraintes du maillage

Un tel système de discrétisation en mailles carrées emboîtées a déjà été utilisé à de nombreuses reprises lors de la modélisation des écoulements souterrains (programme NEWSAM). Il semble particulièrement adapté à ce type d'application pour lequel l'information est souvent répartie irrégulièrement et de qualité variable. Nous avons étendu son application au domaine de surface pour lequel le bénéfice semble moins évident.

En effet, ni la connaissance des paramètres physiographiques, ni la définition de l'arbre d'écoulement de surface n'exigerait une telle discrétisation de taille variable. Seul peut-être peut-on en tirer quelque avantage lors de la distinction de la zone de ruissellement du réseau hydrographique principal plus localisé. La raison majeure de l'adoption de ce mode de discrétisation réside plutôt dans un souci d'homogénéité entre le domaine souterrain et le domaine de surface facilitant la réalisation informatique du modèle.

Ce souci d'homogénéité oblige à respecter certaines lois de découpage à l'intérieur des couches et entre les couches :

— la subdivision doit s'effectuer graduellement dans l'espace de telle sorte qu'une maille donnée ne puisse avoir pour voisine, aussi bien horizontalement que verticalement, qu'une maille de superficie soit identique, soit quatre fois plus grande, soit quatre fois plus petite, conformément à l'exemple suivant :

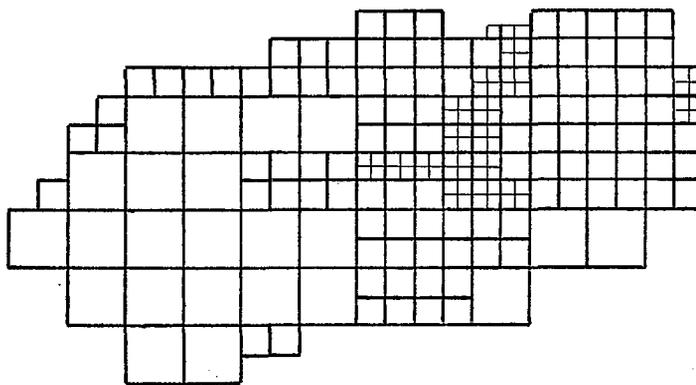


Fig. 6. — Exemple de maillage

On respecte ainsi non seulement une structure logique de la discrétisation de l'information, mais encore une uniformité des approximations qui seront faites ultérieurement lors de la discrétisation des équations du transfert souterrain de l'eau ;

— la discrétisation initiale de chacune des couches, surface et souterrain réunis, doit se correspondre verticalement ;

— le découpage de la couche de surface ne peut être plus raffiné que celui des couches souterraines avec lesquelles elle communique.

### 2.2.2. Définition du réseau de drainage de surface

Le réseau de drainage de surface revêt la forme d'une ou de plusieurs arborescences qui sont définies sans ambiguïté par la connaissance pour chaque maille du domaine de surface d'une direction unique de vidange choisie suivant huit directions possibles du plan, compte tenu du type de discrétisation adopté, comme cela est montré sur la Fig. 7 :

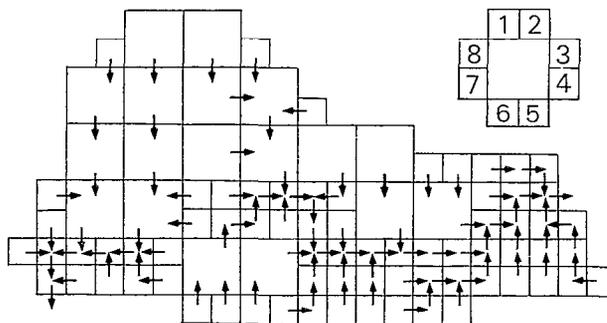


Fig. 7. — Réseau de drainage de surface

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.

#### 2.2.2.1. Réseau hydrographique principal

Chaque arborescence individuelle du réseau d'écoulement, défini précédemment, possède un exutoire représenté par une maille qui ne se vidange dans aucune autre maille du modèle. Ces exutoires seront situés la plupart du temps en bordure du domaine de surface, mais également à l'intérieur figurant le cas de bassins fermés ou endoréiques. (Fig. 8).

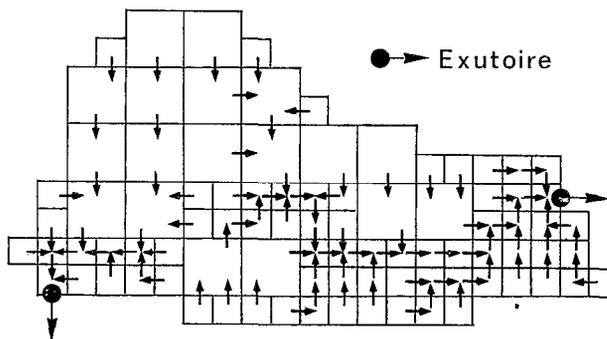


Fig. 8. — Définition des exutoires des bassins

Ayant choisi parmi l'ensemble des exutoires ceux dont on désire une simulation des débits (éventuellement tous), on sélectionne, en remontant de l'aval vers l'amont, créant ainsi une nouvelle arborescence sous-ensemble de la première, les mailles figurant le réseau hydrographique principal que nous appellerons « mailles rivières ». C'est aussi sur ces mailles que sera établi le calcul des échanges à double sens entre les domaines superficiel et souterrain.

A chacun des exutoires ainsi retenus, se trouve correspondre un bassin du domaine de surface représenté par un arbre d'écoulement unique, et sur lequel sera effectué ultérieurement le transfert de l'eau de surface (Fig. 9).

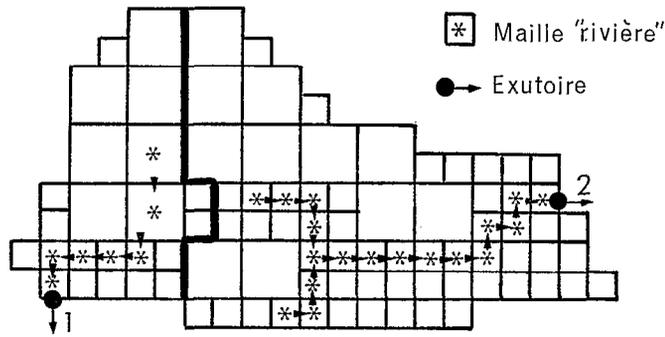


Fig. 9. — Définition des mailles-rivières et des bassins

### 2.2.2.2. Réseau d'écoulement de la zone de ruissellement

Les mailles du domaine de surface non sélectionnées comme « mailles rivières » se classent en deux catégories (Fig. 10).

- celles qui appartiennent à une portion de l'arborescence générale dont l'exutoire ne fait pas partie du réseau hydrographique principal. Elles forment alors un bassin individualisé du domaine de surface pour lequel ni les échanges à double sens avec le domaine souterrain, ni le transfert de surface, ne pourront être simulés par le modèle. Le rôle d'un tel bassin permettra uniquement le calcul et l'introduction vers les aquifères de l'infiltration calculée par la fonction production ;
- et celles qui font partie d'une portion de l'arbre général dont l'exutoire est une maille rivière. Elles constituent alors un « sous-bassin de calcul » du bassin auquel elles appartiennent, sur lequel le calcul de l'infiltration et du débit transféré à l'exutoire sera effectué indépendamment des écoulements souterrains. A chacune des mailles-rivière correspond ainsi un sous-bassin de calcul déterminé par la liste des mailles situées en amont de cette maille-rivière, participant de ce fait à son alimentation et n'appartenant pas elles-mêmes à la catégorie des mailles-rivières\*.

5 numéro du sous-bassin de calcul  
et position de l'exutoire

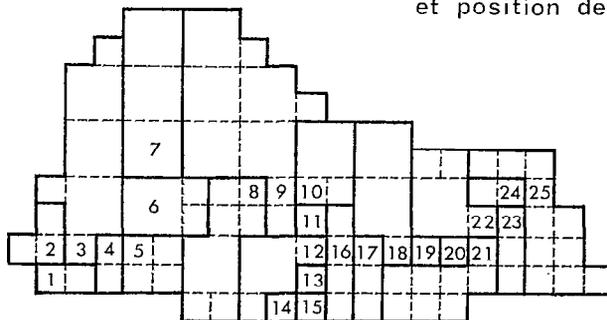


Fig. 10. — Définition des sous-bassins de calcul

\* Remarquons que la définition qui est faite du sous-bassin de calcul ne correspond pas à la définition classique d'un sous-bassin en hydrologie. Dans la suite de l'exposé, il sera fait usage du terme sous-bassin pour désigner le sous-bassin de calcul.

### 2.2.2.3. Remarques et synthèse

Le domaine de surface se trouve divisé en bassins de deux types différents :

- bassins ne possédant pas de mailles-rivières, dont le débit ne sera pas simulé, et permettant seulement le calcul de l'infiltration ;
- bassins possédant des mailles-rivières organisées en une arborescence unique du réseau hydrographique principal en chaque point duquel se vidange éventuellement un sous-bassin. La simulation complète du cycle de l'eau modélisé est assurée sur de tels bassins : calcul de l'infiltration, transfert à l'exutoire, relation nappes-rivières.

Cette subdivision en deux types de bassins 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. Toutes les configurations sont possibles, y compris les configurations extrêmes, à savoir :

- domaine de surface ne comprenant pas de mailles-rivières. Ce serait le cas d'un problème où l'on ne s'intéresserait qu'à des écoulements souterrains déconnectés du réseau hydrographique. Seul le calcul de l'infiltration serait alors requis ;
- domaine ne comprenant que des mailles-rivières. Ce serait le cas d'un problème où les relations nappes-rivières existeraient en tout point et où le calcul complet serait donc partout nécessaire.

### 2.2.3. Définition des caractéristiques physiographiques

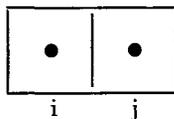
Au stade du programme GEOCOU, la définition des caractéristiques physiographiques se rapporte uniquement au domaine superficiel. Ces caractéristiques sont discrétisées sur les mailles de la couche de surface et concernent dans l'état actuel du modèle :

- l'altitude de la surface topographique d'une part,
- les propriétés du sol vis-à-vis de leur influence sur la fonction production d'autre part.

#### 2.2.3.1. Discrétisation de l'altitude, calcul des temps de transfert relatifs

La distribution de l'altitude sur les mailles de la couche de surface est essentiellement exploitée par le modèle pour le calcul du temps de transfert relatif de l'eau de surface d'une maille vers l'exutoire du bassin auquel elle appartient.

Ce calcul est effectué à partir du temps de transfert entre deux mailles consécutives de l'arbre d'écoulement. Nous admettons que ce dernier temps de transfert est proportionnel à la distance parcourue et inversement proportionnel à la racine carrée de la pente entre mailles.



$z_i$  : altitude de la maille  $i$ ,  
 $d_{ij}$  : distance entre les centres des mailles  $i$  et  $j$ ,  
 $TF_{ij}$  : durée du transfert entre  $i$  et  $j$ .

$$TF_{ij} = k d_{ij} \times \sqrt{\frac{z_i - z_j}{d_{ij}}}$$

Cette formulation, qui ne fait apparaître que la racine carrée de la pente, peut être considérée comme une simplification de la formule de Strickler où l'on aurait négligé l'influence du tirant d'eau (réf. 7).

Pour chaque bassin du domaine de surface, il est alors possible de calculer, en cumulant les temps de transfert individuels, la durée relative du trajet de chaque maille à l'exutoire du bassin. A la plus longue durée du trajet, correspondant au temps de concentration du bassin, est ensuite affectée arbitrairement la valeur 100, ce qui détermine du même coup le coefficient  $k$ .

On constate que la discrétisation de l'altitude sert seulement à établir les durées de trajet relatives de l'eau de surface entre mailles, et qu'elle est, en particulier, indépendante de la définition du réseau d'écoulement. Cette disposition nous a paru simplifier l'entrée des données et permettre une plus grande souplesse. Néanmoins, un contrôle sera assuré pour détecter l'existence éventuelle d'écoulements remontant les pentes. Il en résulte deux remarques quant au choix de la valeur à attribuer à cette altitude dans chaque maille :

- s'il s'agit d'une maille appartenant au réseau de ruissellement pur, le champ des altitudes doit refléter la pente du terrain dans son ensemble sur chacune des mailles. On introduira alors l'altitude moyenne sur la maille déterminée à partir de la carte topographique ;

- s'il s'agit du réseau hydrographique principal, le champ des altitudes doit indiquer dans ce cas la pente moyenne dans les rivières. On introduira alors plutôt la valeur de l'altitude du point bas de la vallée principale sur chaque maille.

#### 2.2.3.2. Discrétisation des caractéristiques des fonctions de production

Afin de donner le maximum de souplesse au modèle couplé, cette discrétisation porte non pas sur la valeur des paramètres des fonctions de production, mais sur l'attribution en chaque maille du domaine de surface de la superficie qui sera ultérieurement affectée à un type donné de « fonction production ». Ceci implique donc, dès à présent, le choix du nombre de fonctions production individuelles qui seront nécessaires à la simulation du comportement de la tranche superficielle du sol sur l'ensemble du modèle. Ce nombre est actuellement limité à 14 en pratique. Les fonctions production utilisées seront individualisées de deux façons différentes :

- d'une part, par le type de mécanismes physiques mis en œuvre. Le modèle retenu sera différent qu'il s'agisse, par exemple, d'un plan d'eau libre, d'une surface imperméable ou d'une zone couverte de forêts ;
- d'autre part, à mécanismes identiques, par la valeur des paramètres caractérisant ces mécanismes. Un sol couvert de haies ou un sol couvert d'herbes pourront être justiciables du même modèle, mais les paramètres quantifiant la rétention de l'eau seront vraisemblablement différents.

On introduira donc, à ce stade du programme, pour chaque maille du domaine de surface, le pourcentage éventuellement nul de la superficie attribuée à chacune des fonctions production. La définition des mécanismes et des paramètres de ces fonctions sera effectuée ultérieurement.

#### 2.2.4. Synthèse des opérations réalisées au stade du programme GEOCOU

Le programme GEOCOU fait usage de données concernant :

- la définition géométrique du domaine hydrologique modélisé :
  - définition des couches,
  - discrétisation des couches en mailles ;
- la définition du réseau de drainage de surface :
  - découpage du domaine de surface en bassins individualisés,
  - choix à l'intérieur de chaque bassin du réseau hydrographique principal et du réseau de ruissellement ;
- définition des caractéristiques physiographiques initiales :
  - discrétisation de l'altitude en vue du calcul des temps de transfert de l'eau sur chaque bassin,
  - attribution des superficies pour chaque fonction production individuelle.

La liaison avec les programmes suivants du modèle est effectuée par fichier magnétique.

### 2.3. PROGRAMME MODSUR : MODÉLISATION DE LA FONCTION PRODUCTION

Le programme MODSUR réalise une première étape dans la simulation du cycle de l'eau sur notre système hydrologique en effectuant d'une part le calcul des différentes fonctions production et, d'autre part, un calcul partiel des transferts de surface conduisant aux débits à l'exutoire des sous-bassins de calcul et au débit dû au seul ruissellement à l'exutoire des bassins.

En plus des résultats issus du programme GEOCOU, ces opérations nécessitent la constitution préalable d'un fichier de données météorologiques.

#### 2.3.1. Données météorologiques

Ces données, conditionnant l'essentiel des apports en eau, constituent, comme cela a déjà été dit, une caractéristique fondamentale du modèle. Elles comprennent :

- données concernant les précipitations,
- données concernant l'évapotranspiration potentielle.

Nous ne discuterons pas ici les méthodes d'acquisition et de traitement éventuel préalable de ces données et nous nous préoccupons seulement de l'utilisation qui en est faite par le modèle.

#### 2.3.1.1. Données concernant les précipitations

L'utilisation de ces données requiert une discrétisation spatiale et une discrétisation temporelle.

##### — *Discrétisation spatiale*

Cette discrétisation est effectuée par zones homogènes dites « zones météo » regroupant un certain nombre de mailles de la couche de surface. Sur chaque zone météo, il sera admis l'uniformité de la précipitation liquide ou solide pour chaque pas de la discrétisation temporelle. Remarquons que cette disposition permet une grande souplesse depuis l'homogénéité complète sur l'ensemble de la couche de surface jusqu'à la discrétisation la plus fine sur chacune des mailles. De plus, la définition des « zones météo » est indépendante du réseau d'écoulement et peut ainsi traduire tout phénomène physique influent tel que la dérive orographique ou l'influence océanique. Dans sa réalisation actuelle, le modèle considère seulement les précipitations liquides. Le cas de la neige pourrait cependant être facilement pris en compte par adjonction au calcul des fonctions production d'un module de fonte des neiges semblable à celui utilisé dans le programme CEQUEAU (réf. 10).

##### — *Discrétisation temporelle*

En fonction des données disponibles, le choix d'un pas de temps unique dit « pas de temps météo » pour l'ensemble des précipitations est effectué. Le modèle peut fonctionner en théorie avec n'importe quel pas de temps. Il est évident que le résultat final, en particulier la modulation du débit écoulé aux exutoires dépendra du pas de temps météo. Compte tenu des méthodes habituelles d'observation, ce pas de temps sera le plus souvent d'un jour.

Les données concernant les précipitations sont préalablement constituées en un fichier comprenant la description en mailles des zones météo et la donnée en chacune de ces zones des lames d'eau pour chaque pas de temps de la période disponible.

#### 2.3.1.2. Données concernant l'évapotranspiration

L'évapotranspiration considérée est l'évapotranspiration potentielle ETP supposée uniforme sur la totalité du domaine de surface. Elle est introduite pour une année moyenne avec un pas de temps compatible avec la méthode de calcul employée. Remarquons que la discrétisation spatiale de l'ETP, suivant des zones homogènes regroupant un certain nombre de mailles de surface, serait tout à fait praticable ; nous n'avons pas envisagé cette possibilité dans l'état actuel du modèle par souci de simplification.

En l'absence de mesures spécifiques, on utilisera le plus souvent les valeurs d'ETP décadaire calculée par la méthode Penman, ou bien l'ETP mensuelle calculée par la formule de Turc ou de Thornthwaite, fréquemment disponible avec ce pas de temps aux stations météorologiques synoptiques.

Compte tenu de la méthode choisie pour l'évaluation des fonctions production, une grande précision dans la connaissance d'ETP n'est pas nécessaire. De plus, le modèle couplé est destiné dans sa phase ultime à fonctionner en prévision, ce qui implique la donnée a priori d'une ETP vraisemblable et non l'introduction du résultat d'une mesure.

#### 2.3.2. Calcul des fonctions production

Les fonctions production réalisent sur le lieu des précipitations le partage entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration réelle et stockage dans le sol. Nous avons admis que ce partage pouvait être fait indépendamment du transfert de surface et du transfert souterrain, tout au moins sur les zones de ruissellement pur. Dans ces conditions, ce calcul est effectué à partir des données météorologiques et des paramètres caractérisant les mécanismes du partage.

Etant donné l'objectif fixé par l'utilisation du modèle couplé, il a paru raisonnable de faire appel, pour le calcul des fonctions production, à des modèles paramétriques appartenant à la catégorie des modèles à réservoirs. Ce choix peut être, à notre avis, justifié par les considérations suivantes :

- l'ambition du modèle couplé est de donner une représentation aussi satisfaisante que possible de la relation pluie-débit sur un système hydrologique avec l'objectif d'être capable de simuler le comportement de la ressource en eau exploitable. La ressource mobilisable sous l'effet de l'activité humaine se trouvant, en majeure partie, localisée dans les aquifères et dans les cours d'eau, il nous a paru opportun d'insister plutôt sur la description phénoménologique de ces deux maillons ;
- les mécanismes physiques régissant les mouvements entre l'eau de surface et l'eau souterraine nous semblent tellement complexes que leur prise en compte par un modèle phénoménologique conduirait à une trop grande lourdeur d'application ;
- la variabilité spatiale des paramètres caractérisant les mécanismes élémentaires n'est pas à l'échelle des problèmes régionaux de ressource en eau qui nous préoccupent. Il suffit, pour s'en convaincre, de considérer

les résultats obtenus lors des études de la zone non saturée, notamment aux USA où, par exemple, aucune relation n'a pu être dégagée sur un champ de quelques km<sup>2</sup> d'une parcelle expérimentale à l'autre concernant la loi de variation de la perméabilité en fonction de la teneur en eau (réf. 21 & 22) :

- bien que paramétrique, l'approche globale des fonctions production est une approche robuste, en ce sens que tout au moins lorsqu'il s'agit de conditions d'applications analogues, la transposition pure et simple des valeurs des paramètres d'un problème à l'autre conduit à un résultat satisfaisant. Ce fait a été démontré ainsi que cela a déjà été dit lors de l'étude des écoulements de surface sur le bassin de l'Orne (France) au moyen du programme CEQUEAU, pour laquelle l'emploi des paramètres de production calés sur le bassin de l'Harricana au Québec a fourni d'emblée des valeurs de débit acceptables.

L'approche globale proposée, si elle permet de s'affranchir en partie des difficultés qui viennent d'être décrites, entraîne cependant un certain nombre de contraintes d'application du modèle couplé :

- tout d'abord, la modélisation du comportement de la tranche superficielle du sol ne permet pas l'accès à des paramètres mesurables caractérisant l'état hydrique dans la zone non saturée. Il sera ainsi difficile d'utiliser le modèle pour déterminer le stock en eau du sol à des fins d'irrigation, par exemple. Peut-être pourra-t-on, dans une certaine mesure, y parvenir en tentant un étalonnage des paramètres du modèle sur les paramètres physiques, mais ceci devra être en principe effectué pour chaque cas d'espèce. Dans la mesure où nous attendons du modèle couplé un outil de simulation de la ressource en eau dans les cours d'eau et dans les nappes, cet inconvénient ne nous semble pas grave. Remarquons de plus que même dans le cas où l'état physique réel du système serait accessible par le modèle, l'utilisation pratique des résultats ne serait pas chose aisée à l'échelle régionale qui nous occupe ;
- en second lieu, bien que, en raison de la robustesse du modèle constatée expérimentalement, un ordre de grandeur des paramètres des fonctions production puisse être a priori retenu, l'approche globale nécessitera un calage. Dans la mesure où le seul contrôle vraiment convaincant est l'adéquation des débits calculés et des débits mesurés aux exutoires, cela implique en général d'effectuer l'ajustement du modèle sur l'ensemble de la simulation. Nous tenterons cependant, procédant étape par étape, de caler des résultats intermédiaires ; c'est la raison qui nous a fait choisir de découper le modèle couplé en quatre programmes s'enchaînant les uns aux autres ;
- en troisième lieu, il ne nous a pas paru possible de s'adapter à l'ensemble des problèmes réels rencontrés au moyen d'une approche paramétrique figée, même dépendant d'un grand nombre de paramètres. C'est pourquoi nous pensons nécessaire de laisser à l'utilisateur le choix de construire le ou les modèles de fonctions production les plus adaptés à son problème, et avons pour cela tenté de faciliter l'accès informatique à cette partie du modèle.

### 2.3.2.1. Description des fonctions production

Compte tenu de la dernière remarque, nous proposerons ici deux types de fonction production dépendant d'un faible nombre de paramètres, dus à G. Girard (ORSTOM), et ayant donné d'excellents résultats dans un grand nombre d'applications (réf. 9 bis). Ces deux types seront considérés comme les fonctions standard du modèle couplé. Ce choix ne sera justifié qu'a posteriori par l'aptitude de ces modèles à rendre compte des observations sur deux exemples qui seront traités ultérieurement.

#### — Cas des sols

La notion de sol sera prise ici dans un sens très général figurant toute partie de notre système hydrologique où s'effectue un bilan hydrique en milieu non saturé. Les mécanismes modélisés seront identiques qu'il s'agisse d'un sol nu ou d'un sol couvert de végétation, et quelle que soit cette végétation. Seuls les paramètres caractérisant ces mécanismes seront susceptibles de varier.

Le modèle comprend un réservoir dit « réservoir sol » dans lequel s'effectue le bilan hydrique entre infiltration, ruissellement et évaporation, puis un certain nombre de réservoirs de transfert, généralement un ou deux, chargés de moduler la libération de l'eau vers le domaine de surface et vers le domaine souterrain (Fig. 11).

Le bilan hydrique est effectué pour chaque pas de temps météo à partir de la lame d'eau précipitée P, de l'évapotranspiration potentielle ETP et de l'état du stock en eau dans le réservoir sol R, suivant le schéma de la Fig. 11.

La quantité d'eau disponible EAU, pour la mise en circulation est réglée d'après la valeur du stock R par rapport au niveau minimal DCRT et moyen CRT du réservoir sol, suivant la formulation adjointe à la Fig. II-8. L'évapotranspiration réelle est ensuite prélevée dans la réserve restante après départ de l'eau disponible jusqu'à concurrence de l'évapotranspiration potentielle ETP.

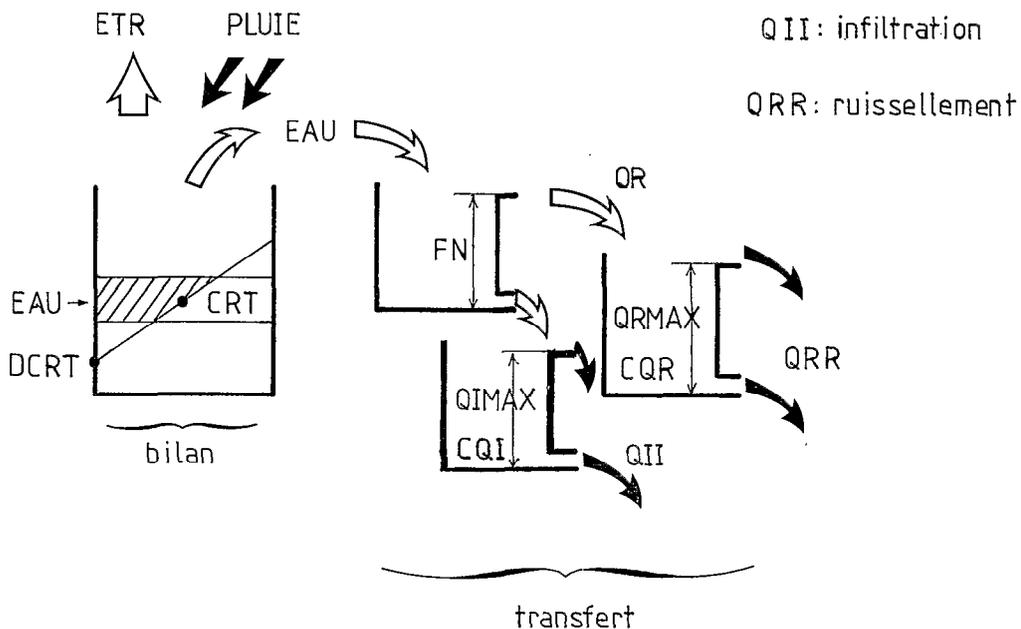
Les réservoirs de transfert ont ensuite pour tâche de répartir l'eau disponible en une lame ruisselée QR et une lame infiltrée QI. Cette répartition est effectuée au moyen d'un premier réservoir de transfert par comparaison de la quantité EAU avec un seuil maximal d'infiltration FN. Un second réservoir de transfert règle ensuite la libération de l'eau ruisselée QR en simulant le ruissellement pur et le ruissellement retardé QRR au moyen des

paramètres QRMAX et CQR. Enfin, un troisième réservoir de transfert provoque éventuellement un retard entre l'infiltration et l'alimentation de la nappe dépendant des paramètres QIMAX représentant le seuil de débordement de ce réservoir et CQI coefficient de vidange.

La fonction production ainsi décrite dépend de sept paramètres, à savoir :

Réservoir de bilan	}	DCRT : valeur minimale en mm du stock en eau dans le sol, en deçà de laquelle aucune quantité d'eau n'est disponible. Ce paramètre règle principalement le rôle des premières pluies survenant après une période de sécheresse.
		CRT : valeur moyenne en mm du stock en eau dans le sol. L'évapotranspiration réelle croît en fonction de ce paramètre qui conditionne ainsi le bilan hydrique global
Réservoirs de transfert	}	① FN : valeur maximale de l'infiltration sur un pas de temps. Ce paramètre régit le partage entre ruissellement et infiltration.
		② CQR : coefficient de tarissement du réservoir de ruissellement.
		QRMAX : niveau de débordement du réservoir de ruissellement. Ces paramètres établissent la répartition entre ruissellement pur et ruissellement retardé.
		③ CQI : coefficient de tarissement du réservoir d'alimentation de la nappe.
		QIMAX : niveau de débordement du réservoir d'alimentation de la nappe. Ce réservoir de transfert introduit un retard entre l'infiltration et l'alimentation de la nappe.

Nous verrons plus loin que le modèle couplé dispose d'un autre moyen plus élaboré pour représenter ce phénomène de retard à l'infiltration (programme NONSAT), qui se substituera lorsque les données le permettront à cette représentation simplifiée par un réservoir unique.



$$\begin{aligned}
 RMAX &= 2(CRT - DCRT) + DCRT & QR &= \max(0, EAU - QI) \\
 RBA &= \max(DCRT, R) - DCRT & ETR &= \min(R + P - EAU, ETP) \\
 RHA &= \min(R + P, RMAX) - DCRT & R &= R + P - EAU - ETR \\
 DR &= \max(0, RHA - RBA) \\
 EAU &= \max(RP - RMAX, 0) + DR(2RBA + DR) / (4(CRT - DCRT)) \\
 QI &= \min(EAU, FN)
 \end{aligned}$$

Fig. 11. — Schéma de principe de la fonction production type « sol »

L'intérêt de ce type de fonction production réside, à notre avis, dans les points suivants :

— Les paramètres sont peu nombreux, en fait au nombre de deux puisque la quantité d'eau écoulee dépend uniquement du réservoir de bilan, les cinq autres paramètres réglant la façon dont cet écoulement doit s'effectuer. De plus, ces paramètres, sans être strictement mesurables in situ ont un rapport avec des grandeurs physiques représentatives de l'état du système ;

— l'eau disponible pour l'écoulement varie de façon continue avec le stock en eau, ce qui est effectivement observé en pratique ;

— le modèle présente une grande souplesse d'emploi et permet ainsi de traiter des cas usuels extrêmes, tels que le sol rigoureusement imperméable ou le sol dépendant d'un paramètre unique, la réserve facilement utilisable (RFU) des agronomes. Ce dernier cas est obtenu pour  $DCRT = CRT = RFU$  et  $FN = \infty$ .

— Cas des plans d'eau libre

Ce type de fonction production traite le cas des plans d'eau libre du domaine de surface dont la superficie n'est pas négligeable. Deux situations sont alors possibles :

- ces plans d'eau libre ne font pas partie du réseau hydrographique principal. Dans ce cas, les transferts vers le souterrain ne sont autorisés que de haut en bas, et pris en charge par la fonction production.

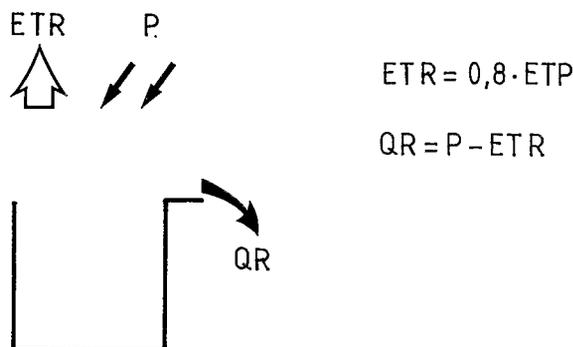


Fig. 12. — Schéma de la fonction production type « plan d'eau »

- ces plans d'eau font partie du réseau hydrographique principal. Dans ce cas, les relations avec le milieu souterrain seront traitées en même temps que les transferts et la fonction production se borne à évaluer le ruissellement.

Il est de plus admis, dans l'état actuel du modèle, que la superficie des plans d'eau ne varie pas avec la hauteur d'eau dans le réservoir.

### 2.3.2.2. Mise en œuvre des fonctions production

Chaque type de fonction production choisi par l'utilisateur est mis en œuvre pour chacune des zones météorologiques et sur l'ensemble des « pas de temps météo » constituant la période de simulation. Ce calcul peut ainsi être tout d'abord entièrement effectué en lame d'eau sans tenir compte d'une discrétisation autre que celle des précipitations.

Les lames d'eau infiltrées sont ensuite converties en volumes disponibles à chaque pas de temps pour chacune des mailles de la couche de surface, en fonction de leur appartenance à telle zone météorologique et en fonction de la superficie qui y est attribuée à chaque fonction production.

Les lames d'eau destinées au ruissellement sont à leur tour transférées partiellement suivant les modalités que l'on va décrire.

### 2.3.3. Transfert de l'eau de surface sur les zones de ruissellement pur

Ce type de transfert considère le cas de l'eau disponible pour le ruissellement sur les mailles du domaine de surface qui n'appartiennent pas au réseau hydrographique principal.

Le transport de l'eau y est effectué globalement pour chaque sous-bassin et pour chaque pas de temps météo en tenant compte de la durée de trajet de l'eau d'une maille jusqu'à l'exutoire du sous-bassin. Ce calcul implique la discrétisation des sous-bassins en zones isochrones rassemblant les mailles présentant une durée de trajet identique jusqu'à l'exutoire.

### 2.3.3.1. Etablissement des zones isochrones

Connaissant les durées de transfert relatives d'une maille à l'autre, la durée du trajet d'une maille à l'exutoire du sous-bassin auquel elle appartient est calibrée à partir de la donnée du temps de concentration des bassins. Sont alors regroupées à l'intérieur d'une même zone isochrone les mailles dont la durée du parcours à l'exutoire contient le même nombre entier de pas de temps météo. Le nombre de zones isochrones retenu par sous-bassin dépend donc du rapport entre le temps de concentration du bassin et le pas de temps météorologique.

### 2.3.3.2. Algorithme de transfert sur un sous-bassin de calcul

L'algorithme défini ci-dessous fournit pour chaque pas de temps météo le volume ruisselé à l'exutoire de tous les sous-bassins, c'est-à-dire en fin de compte dans chacune des mailles rivières

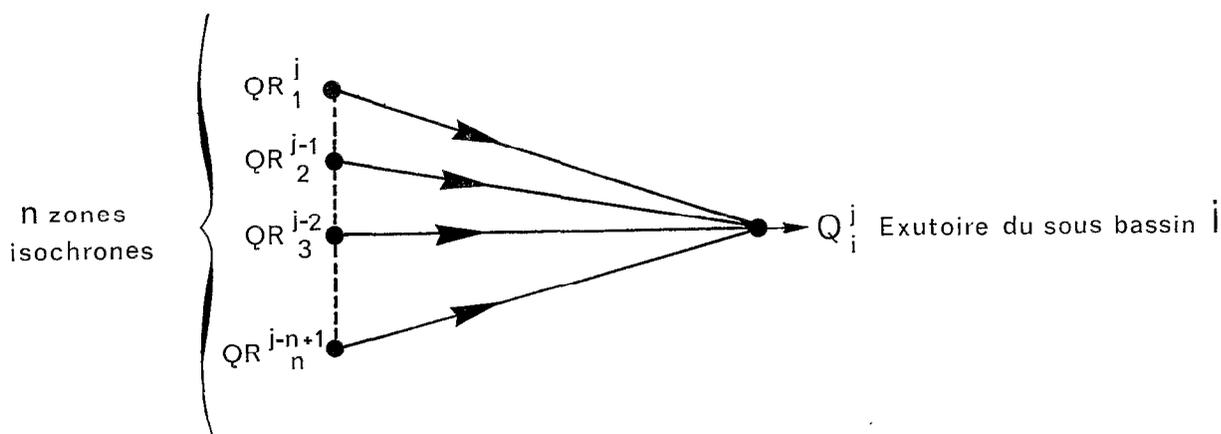


Fig. 13. — Algorithme de transfert sur un sous-bassin de calcul

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

où  $Q_i^j$  est le volume ruisselé au pas de temps  $j$  à l'exutoire du sous-bassin  $i$ ,  
 $QR_k^{j-k+1}$  est le volume disponible calculé au pas de temps  $j-k+1$  sur la zone isochrone de numéro  $k$ ,  
 $n$  est le nombre total de zones isochrones.

Les volumes disponibles QR sont eux-mêmes établis à partir des lames d'eau ruisselée issues des fonctions production et des superficies attribuées à ces fonctions dans les mailles constituant les zones isochrones.

L'algorithme de transfert de l'eau sur les sous-bassins de calcul appelle les remarques suivantes :

- le transfert de l'eau est effectué globalement, ce qui implique que le débit ne peut être calculé qu'à l'exutoire des sous-bassins à l'exclusion de tout autre point ;
- le calcul considère que les écoulements en provenance des zones isochrones s'effectuent en parallèle, donc sans possibilité de laminage des crues au passage d'une zone à l'autre. Il serait cependant facile de prendre en compte une loi de tarissement globale pour chaque zone isochrone si le besoin s'en faisait sentir ;

- l'eau disponible pour le ruissellement en un point du sous-bassin ne peut s'infiltrer en aval au cours de son trajet vers l'exutoire ; les communications avec le domaine souterrain ayant déjà été réglées auparavant lors du calcul des fonctions production.

Rappelons que ces contraintes peuvent être éliminées si nécessaire en augmentant le nombre des mailles rivières, ce qui limite du même coup la superficie des sous-bassins de calcul.

#### 2.3.4. Transfert partiel de l'eau de surface dans le réseau hydrographique principal

Ce transfert ne pourra être réglé définitivement que conjointement au transfert souterrain. Le programme MODSUR ne tente de réaliser ici qu'une première approche partielle et provisoire du mouvement de la seule eau ruisselée.

Le transfert est effectué indépendamment pour l'ensemble des bassins simulés de la couche de surface, c'est-à-dire ceux comportant des mailles rivières. Le calcul y est mené de façon analogue au cas des sous-bassins en regroupant les mailles rivières par zones isochrones déterminées d'après leur temps de transfert à l'exutoire, puis en acheminant l'eau disponible issue du calcul sur les sous-bassins, globalement vers l'exutoire du bassin.

Les remarques faites plus haut concernant l'algorithme des sous-bassins sont également valables. Il n'est, en particulier, pas possible à ce stade provisoire de la modélisation de prendre en compte des stockages intermédiaires dans des lacs ou des retenues sur le cours des rivières.

#### 2.3.5. Synthèse des opérations réalisées par le programme MODSUR

Le programme MODSUR fait usage, sur le domaine de surface, de données concernant :

- la météorologie :
  - précipitations,
  - évapotranspiration potentielle ;
- les mécanismes de la production :
  - choix des modèles de fonctions production,
  - choix des paramètres des fonctions production.
- les durées de transfert de surface :
  - temps de concentration des bassins simulés.

Le programme calcule alors, suivant un pas de temps constant appelé « pas de temps météo » coïncidant avec la discrétisation temporelle des précipitations, le bilan hydrologique du domaine de surface ce qui aboutit aux résultats suivants :

- eau disponible en provenance du ruissellement sur les sous-bassins en chacune des mailles rivières ;
- eau disponible pour l'infiltration vers le domaine souterrain sur chacune des mailles du domaine de surface.

Ces résultats stockés sur fichier magnétique à chaque pas de temps seront utilisés à un stade ultérieur de la simulation.

Dès à présent, une première approche du calage du modèle est possible :

##### 2.3.5.1. Ajustement du bilan hydrologique global

Cet ajustement peut être fait sur l'ensemble de la période des observations disponibles ou sur toute durée partielle au choix :

- *calage du bilan hydrique* : il résulte de la comparaison, sur une période donnée, pour chaque bassin entre le volume mesuré écoulé aux exutoires et la résultante de l'infiltration et du ruissellement calculés par le modèle. Le réglage porte sur l'évapotranspiration réelle régie par les paramètres concernant le réservoir de bilan des fonctions production ;
- *calage de la répartition entre infiltration et ruissellement* : ce calage suppose que l'on soit capable de distinguer sur les débits observés la part en provenance du ruissellement de celle en provenance des nappes souterraines. Nous illustrerons ceci par la suite au moyen de deux exemples. Le réglage porte également dans ce cas sur les fonctions production et concerne les paramètres de répartition de l'eau disponible à la sortie du réservoir de bilan.

### 2.3.5.2. Ajustement des temps de concentration

Cet ajustement est effectué indépendamment sur chaque bassin versant et consiste à régler le temps de concentration de façon à obtenir le synchronisme entre les pointes de crues observées et la composante due au seul ruissellement des crues calculées, en modifiant l'organisation en zones isochrones.

Ceci n'est évidemment possible que dans le cas où le système hydrologique étudié présente une part non négligeable de transfert par ruissellement. Dans le cas contraire, il sera nécessaire d'estimer a priori la valeur des temps de concentration avant de poursuivre plus avant la modélisation.

## 2.4. PROGRAMME NONSAT : MODÉLISATION DES TRANSFERTS DANS LA ZONE NON SATURÉE

Le programme NONSAT a pour rôle d'assurer la transformation du débit d'infiltration issu des fonctions production en débit d'alimentation parvenant aux nappes dans le cas où ce problème n'a pu être réglé correctement par l'emploi de ces seules fonctions, au moyen du réservoir de transfert de l'infiltration par exemple.

Pour ce faire, nous nous sommes largement inspirés des travaux récents de M. Besbes concernant l'estimation des apports aux nappes souterraines (réf. 2). Cet auteur distingue deux aspects complémentaires dans l'analyse du processus d'alimentation des nappes :

- évaluer la part des précipitations qui s'infiltré et parviendra effectivement à la nappe. C'est le calcul de l'infiltration efficace qui est effectué par les fonctions production ;
- décrire les mécanismes du transfert de l'eau entre le moment où elle ressort du réservoir sol et celui où elle rejoint la nappe. Si l'on admet que ces mécanismes sont conservatifs, cela revient à définir la fonction de retard à l'infiltration.

C'est à cette dernière question que se propose de répondre le programme NONSAT.

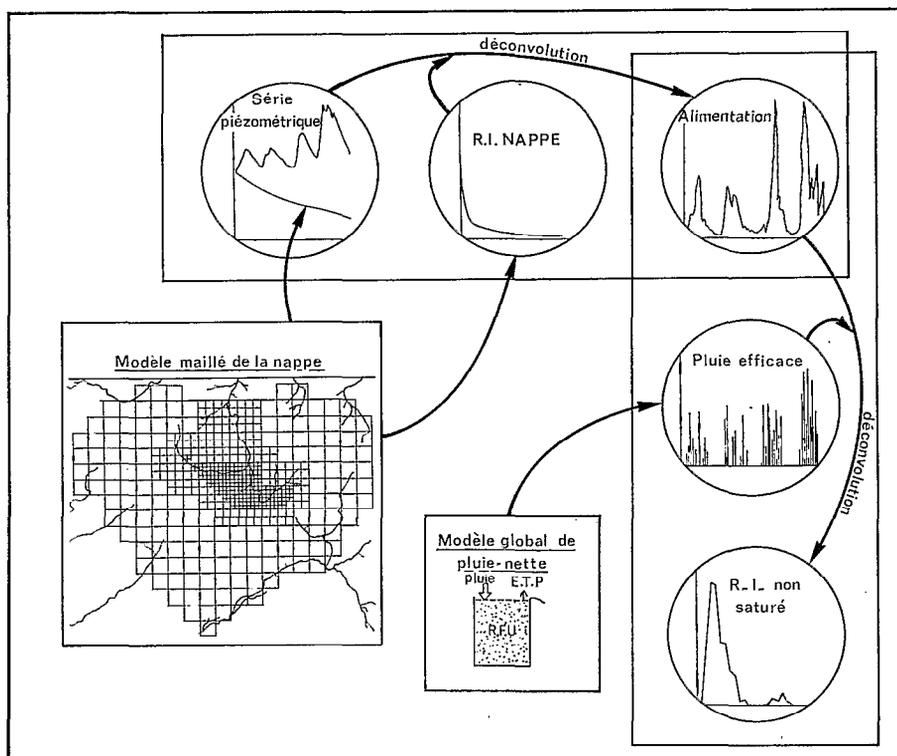


Fig. 14. — Schéma de principe de la méthode du calcul de l'infiltration proposée par M. Besbes

Dans le but d'estimer cette fonction de retard, M. Besbes propose une méthodologie assez complexe basée sur l'exploitation de la relation entre les débits d'infiltration et la variation du niveau piézométrique des nappes. Cette méthode exige deux déconvolutions en série, la première pour identifier la relation entre le débit d'alimentation de la nappe et la variation du niveau piézométrique, la seconde pour identifier la relation entre débit d'infiltration et débit d'alimentation, c'est-à-dire finalement la fonction de retard qui nous préoccupe. La première déconvolution implique de savoir distinguer sur les variations piézométriques la part de l'influence due à l'alimentation et la part qui aurait été observée en l'absence d'alimentation. Cette distinction est réalisée au moyen d'un modèle mathématique maillé de l'écoulement dans la nappe qui, une fois calé, permet de reconstituer le tarissement sans alimentation. Comme le calage de ce modèle dépend en partie du résultat du calcul de l'alimentation, il est nécessaire de procéder par itérations suivant le schéma de la Fig. 14 précédente, empruntée à M. Besbes.

La méthode proposée considère la zone non saturée comme une boîte noire représentant un système linéaire et stationnaire où les mécanismes physiques ne sont envisagés que sous l'aspect de leur manifestation globale, c'est-à-dire la liaison entre le débit d'infiltration et le débit d'alimentation des nappes.

L'hypothèse de linéarité est sans doute une approximation grossière qui serait inacceptable à l'échelle de la parcelle de terrain, échelle à laquelle se réfèrent les mesures dans la zone non saturée. A l'échelle régionale de la zone non saturée surmontant une nappe, on peut cependant penser que la nécessité de moyenniser les effets de phénomènes individuellement non linéaires, mais de grande variabilité spatiale redonne une certaine acceptabilité à l'approximation commise.

Bien que le processus de calcul proposé soit parfaitement compatible avec la méthode d'approche du modèle couplé, nous avons préféré une caractérisation plus simple de la zone non saturée au moyen de lois théoriques dépendant d'un petit nombre de paramètres ainsi que cela a été fait pour les fonctions production. Cette seconde manière de voir les choses est d'ailleurs envisagée et critiquée par rapport à la première par M. Besbes lorsqu'il recommande l'utilisation du modèle à réservoirs développés par J. E. Nash (1957-1959) pour décrire l'écoulement de surface (Réf. 20).

C'est un modèle de ce type que nous avons adapté au modèle couplé et dont nous allons donner une rapide description.

#### 2.4.1. Retard à l'infiltration

Entre le moment où l'eau s'infiltré dans le sol et celui où elle parvient à la nappe, il existe un certain retard qui dépend a priori de deux paramètres :

- la perméabilité de la zone non saturée,
- la profondeur de la surface libre de la nappe sous le sol.

Etant donné qu'il sera difficile, sinon impossible, de recueillir des informations à l'échelle régionale sur la répartition verticale de la perméabilité de la zone non saturée, on considèrera le milieu comme homogène en première approximation et tentera de moduler la fonction de retard en un point donné en fonction de la seule profondeur de la nappe. M. Besbes a cependant montré, sur le bassin de la Lys dont nous reprendrons l'étude plus loin à titre d'exemple, qu'il était difficile d'établir une relation directe entre la profondeur et le déphasage en un piézomètre.

#### 2.4.2. Le modèle de Nash

Nous considèrerons avec M. Besbes que la zone non saturée peut être comparée à une succession de  $N$  réservoirs ayant chacun une capacité d'emmagasinement de l'eau. Ces réservoirs se déversent les uns dans les autres suivant une loi de tarissement commune caractérisée par un temps de délai unique  $TAU$  (Fig. 15). Si l'on admet l'analyse suivante, en considérant que :

- la zone non saturée est découpée en tranches horizontales homogènes et d'égale épaisseur,
  - les transferts de l'eau entre les tranches sont verticaux et régis par une perméabilité unique,
- dans ces conditions, le paramètre  $N$  est fonction de l'épaisseur totale de la zone non saturée et la constante de temps caractérise la vitesse verticale de percolation.

Le modèle à réservoirs de Nash obéit à la représentation mathématique suivante :

Soit  $V_i^j$  le stock en eau dans le réservoir  $i$  au pas de temps  $j$ . Au pas de temps  $j$ , le réservoir n° 1 reçoit une lame d'eau infiltrée  $QI^j$  qui amène son contenu à la valeur  $V_1^j + QI^j$ . Ce stock en eau se vidange exponentiellement pour prendre à la fin du pas de temps la valeur :

$$V_1^{j+1} = (V_1^j + QI^j) e^{-\frac{\Delta t}{TAU}}$$

tandis qu'il alimente de la valeur  $(V_1^j + QI^j) (1 - e^{-\frac{\Delta t}{TAU}})$  le réservoir n° 2. Le processus se poursuit de proche en proche jusqu'à épuisement du nombre de réservoirs.

On peut montrer que le débit à l'instant  $t$  à la sortie du  $N^{\text{ième}}$  réservoir résultant d'une recharge brusque d'amplitude  $\Delta QI$  appliquée au 1<sup>er</sup> réservoir à l'instant  $\tau$  ( $\tau < t$ ) s'exprime par la relation :

$$Q_N(t) = \frac{\Delta QI(\tau)}{TAU \cdot (N-1)!} e^{-(t-\tau)/TAU} \cdot \left(\frac{t-\tau}{TAU}\right)^{N-1}$$

Cette expression conserve un sens si  $N$  n'est pas entier sous l'aspect de la loi de distribution Gamma.

$$Q_N(t) = \frac{\Delta QI(\tau)}{TAU \cdot \Gamma(N)} e^{-(t-\tau)/TAU} \cdot \left(\frac{t-\tau}{TAU}\right)^{N-1}$$

En pratique, la recharge  $\Delta QI$  varie à chaque instant et le débit sortant du réservoir  $N$  prend la forme :

$$Q(t) = \int_0^t \left(\frac{\partial QI}{\partial t}\right)_\tau \frac{e^{-(t-\tau)/TAU}}{TAU \cdot \Gamma(N)} \left(\frac{t-\tau}{TAU}\right)^{N-1} d\tau$$

Les propriétés de la loi de distribution  $\Gamma$  permettent de mieux comprendre l'effet de retard du modèle en remarquant que la moyenne représentant la date de sortie du centre de gravité d'une infiltration instantanée s'exprime par  $N \cdot TAU$ , et que la variance représentant l'étalement de cette infiltration est donnée par  $N \cdot TAU^2$ . L'influence des paramètres  $N$  et  $TAU$  est illustrée sur la Fig. 16, empruntée à M. Besbes.

En comparant les fonctions de retard engendrées par le modèle de Nash à celles qu'il avait obtenues par identification de la relation entre les variations piézométriques et l'infiltration suivant la méthodologie qu'il avait développée, M. Besbes a montré l'aptitude du modèle à réservoirs de Nash à représenter globalement les transferts à travers la zone non saturée, lors d'une application au besoin de la Lys dans le nord de la France que nous reprendrons à titre d'exemple.

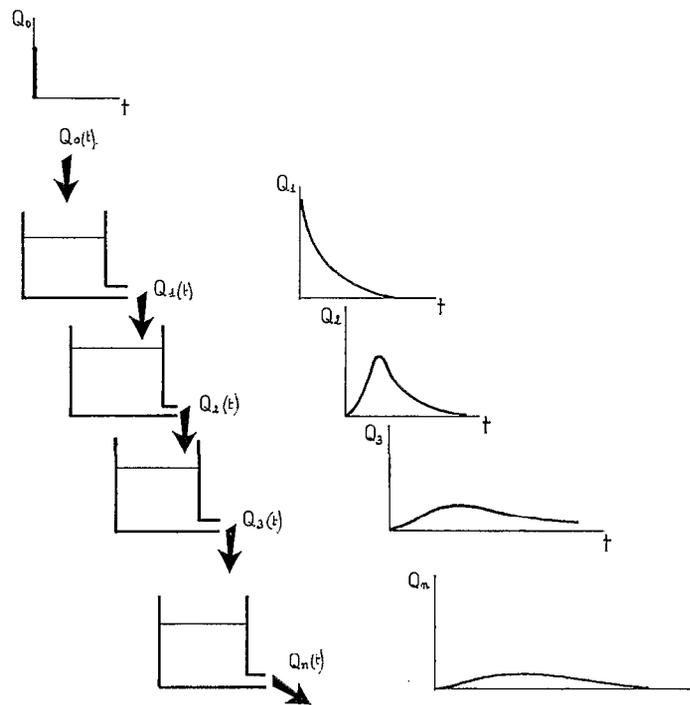


Fig. 15. — Principe du modèle de Nash

### 2.4.3. Mise en œuvre du modèle de Nash

Ce modèle est appliqué pour chaque pas de temps météo à la distribution des débits d'infiltration calculée par le programme MODSUR suivant une discrétisation spatiale obtenue par regroupement des mailles de la couche de surface en zones homogènes présentant des propriétés uniformes du point de vue des transferts dans la zone non saturée.

A chaque zone homogène ainsi définie est attribué un jeu de paramètres  $N$ , nombre de réservoirs et  $TAU$ , temps de délai des réservoirs, dont les valeurs doivent être déterminées par calage portant sur la restitution par le modèle couplé du déphasage entre l'infiltration et les variations piézométriques d'une part et l'infiltration et le débit de base aux exutoires d'autre part.

L'ajustement définitif du modèle de la zone non saturée ne pourra donc être effectué qu'à l'issue de la simulation complète. Le choix a priori des paramètres  $N$  et  $TAU$  sera toutefois orienté en se souvenant que le nombre de réservoirs caractérise en général l'épaisseur de la zone non saturée et que le temps de délai est lié à la perméabilité verticale de cette zone.

Le programme NONSAT constitue finalement un fichier magnétique contenant le débit d'alimentation des nappes en chaque maille de la couche de surface et pour chaque pas de temps météo. Son emploi est optionnel suivant le problème posé et fonction du retard que la zone non saturée est susceptible d'infliger à l'alimentation, compte tenu du pas de temps utilisé. C'est pour cette raison que nous avons traité le problème dans un programme séparé qui, suivant les cas, pourra être soit laissé de côté, soit associé au programme MODSUR, soit associé au programme MODCOU, phase ultime de la simulation.

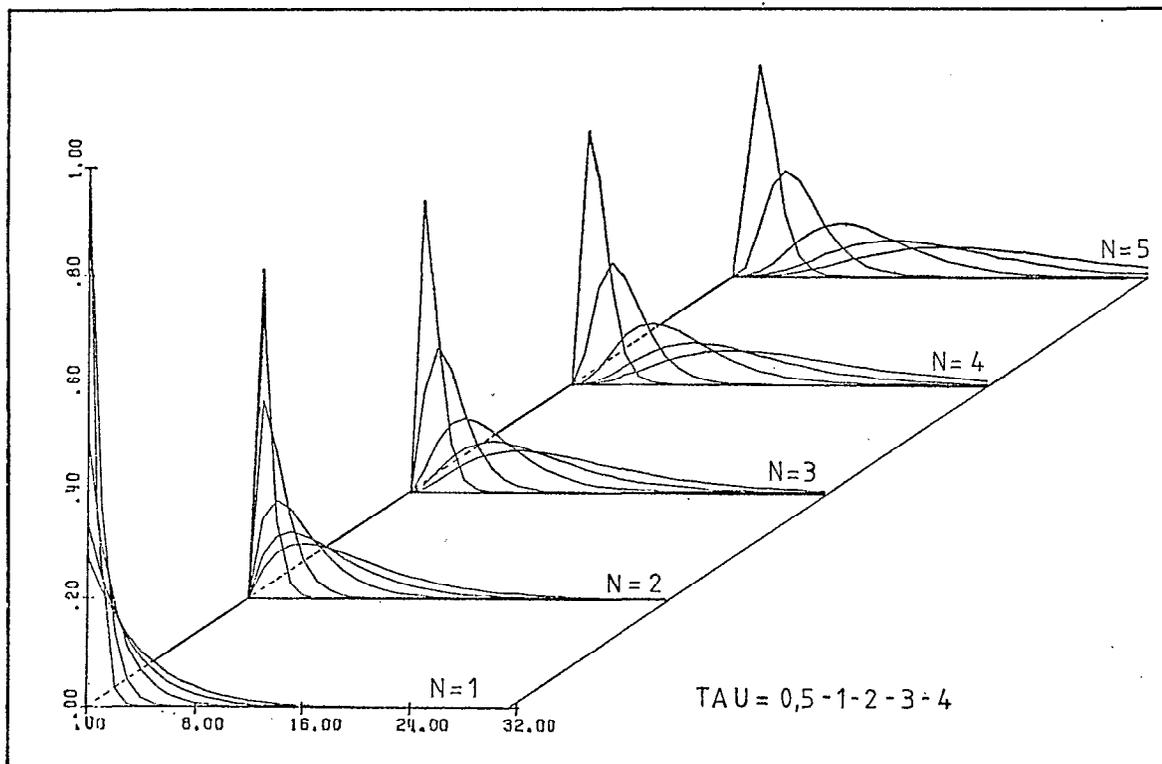


Fig. 16. — Allure de la loi Gamma, influence de  $TAU$  et  $N$

## 2.5. PROGRAMME MODCOU : SIMULATION CONJOINTE DES TRANSFERTS DE SURFACE ET DES TRANSFERTS SOUTERRAINS

Le programme MODCOU intervient au dernier stade de la modélisation et constitue de ce fait la pièce maîtresse du modèle couplé.

Ce programme effectue le transfert souterrain dans les aquifères, et le transfert de l'eau de surface dans le réseau hydrographique principal en tenant compte de la relation nappes rivières. Le résultat de la simulation concerne les variations du niveau piézométrique en tout point des nappes et les débits aux exutoires ainsi qu'en diverses stations hydrométriques choisies sur le cours des rivières.

### 2.5.1. Le transfert souterrain

Le modèle utilisé pour le transfert souterrain, devenu classique en hydrogéologie, est basé sur l'intégration numérique de l'équation de diffusivité régissant les écoulements en milieu poreux. Il s'agit, dans notre cas, de la transcription presque littérale du programme NEWSAM déjà cité, et destiné à la simulation des écoulements souterrains dans les systèmes aquifères multicouche (réf. 14). L'emploi de ce programme en de nombreuses occasions sur des bassins de comportement et d'environnement variés a permis d'apprécier son aptitude au traitement des problèmes régionaux de ressources en eau souterraine.

Nous nous bornerons donc, dans ce mémoire, à rappeler le principe du modèle souterrain, en insistant plus particulièrement sur les aménagements nécessités par le couplage avec la surface.

#### 2.5.1.1. Le modèle de transfert

La schématisation multicouche d'un système hydrogéologique, déjà évoquée au chapitre 2, paragraphe 2, 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 communications notables entre les aquifères à l'échelle régionale.

Le modèle de transfert souterrain considère que les écoulements sont bidimensionnels plans dans les aquifères et monodimensionnels orthogonaux au plan des premiers dans les semi-perméables.

Dans ces conditions, le domaine souterrain modélisé prend l'aspect d'un empilement de couches connectées les unes aux autres (cf. Fig. 17). Cette disposition privilégie les aquifères par rapport aux semi-perméables, ce qui est sans préjudice s'agissant d'une étude de ressources en eau.

Appliquant alors sur un tel système les lois régissant l'écoulement en milieu poreux : loi de Darcy, principe de continuité, équations d'état, on est amené à écrire sur chacune des couches aquifères une équation aux dérivées partielles, dite équation de diffusivité, reliant la variation du niveau piézométrique dans la nappe aux débits circulant dans le système.

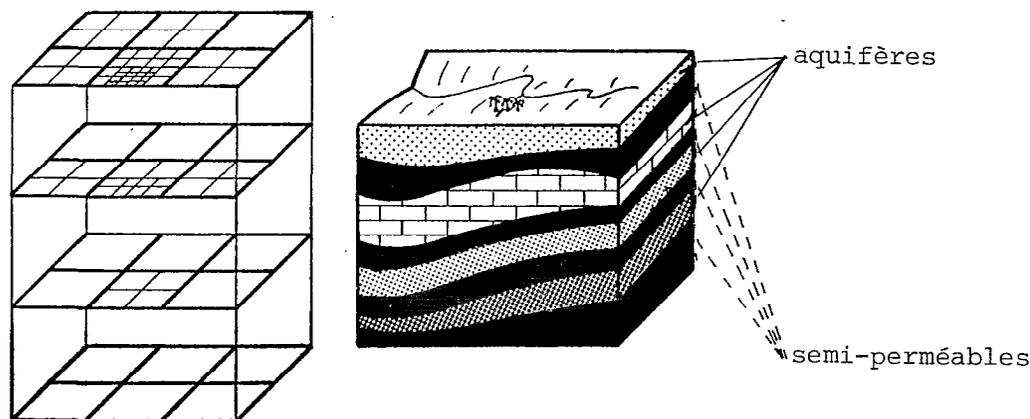


Fig. 17. — Schématisation multicouche

Dans un repère quelconque situé dans le plan des couches, l'équation de diffusivité s'écrit :

$$\operatorname{div} (\bar{T} \operatorname{grad} h) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q + q_{\text{sup}} + q_{\text{inf}}$$

avec les notations suivantes :

$h$  : charge hydraulique (ou potentiel hydraulique ou cote piézométrique) fonction des coordonnées d'espace  $x, y$  dans le plan des couches et du temps ( $[L]$ ),

$\bar{T}$  : transmissivité d'une couche aquifère, grandeur tensorielle variable dans l'espace ( $[L^2] [T^{-1}]$ ),

$S$  : coefficient d'emménagement d'une couche, grandeur scalaire variable dans l'espace (sans dimension),

$q$  : débit prélevé algébriquement par unité de surface dans une couche, il contiendra éventuellement le débit échangé avec le domaine de surface ( $[L] [T^{-1}]$ ),

$q_{\text{sup}}, q_{\text{inf}}$  : débits surfaciques échangés à travers les semi-perméables supérieur et inférieur, ils caractérisent le comportement des semi-perméables réglant les échanges entre couches aquifères ( $[L] [T^{-1}]$ ).

Le modèle sera considéré dans le sens direct, c'est-à-dire que l'on cherchera à résoudre simultanément les équations de diffusivité de chaque couche en considérant la fonction  $h$  comme inconnue.

Les transmissivités, les coefficients d'emménagement, et les débits échangés avec le milieu extérieur au domaine souterrain, feront office de paramètres qui seront soit introduits en données, soit issus des phases de calcul précédentes du modèle couplé.

Les semi-perméables réglant les échanges entre couches aquifères seront supposés non capacitifs, c'est-à-dire que nous négligerons les variations éventuelles de la quantité d'eau stockée en leur sein, en y admettant à chaque instant l'établissement d'un écoulement permanent. Dans ces conditions, les débits surfaciques entre couches dépendent uniquement de la perméabilité verticale  $K$  supposée uniforme et de l'épaisseur  $l$  du semi-perméable.

$$q_{\text{sup}} = \frac{K_{\text{sup}}}{l_{\text{sup}}} (h - h_{\text{sup}}) \text{ pour le semi-perméable supérieur}$$

$$q_{\text{inf}} = \frac{K_{\text{inf}}}{l_{\text{inf}}} (h - h_{\text{inf}}) \text{ pour le semi-perméable inférieur}$$

si  $h_{\text{sup}}$  et  $h_{\text{inf}}$  sont les charges hydrauliques régnant à l'instant  $t$  dans les couches situées au-dessus et au-dessous de la couche considérée.

Notons que l'hypothèse du semi-perméable non capacitif n'est pas une contrainte du modèle, mais seulement un choix que nous avons fait dans l'état actuel de la modélisation par souci de simplicité, et que l'expérience valide dans la plupart des applications pratiques. Ces problèmes ont été traités par différents auteurs (réf. 3).

#### 2.5.1.2. Les relations avec le milieu extérieur au domaine souterrain

Ces relations concernent les conditions aux limites et les termes « sources » qui règlent les échanges entre le domaine souterrain et le milieu extérieur. Ainsi que nous l'avons décrit au chapitre I, le milieu extérieur peut revêtir différents aspects :

- aquifères en relation avec le domaine souterrain étudié,
- bassins hydrologiques ne faisant pas partie de la portion simulée du domaine de surface modélisé,
- bassins hydrologiques faisant partie de la portion simulée du domaine de surface modélisé.

Cette dernière situation concerne le couplage surface-souterrain et sera donc traitée dans un chapitre à part comme il se doit.

Le modèle souterrain dispose, pour représenter les deux autres situations, de deux types de conditions aux limites :

- condition de flux imposé : cela consiste à prescrire, en fonction du temps sur la limite, ou bien en toute autre partie du domaine (terme « source »), la valeur du débit échangé avec le milieu extérieur,
- condition de charge imposée : cela consiste à prescrire, en fonction du temps sur la limite, la valeur de la charge hydraulique établie d'après le comportement du milieu extérieur.

Moyennant certains aménagements qui seront décrits plus loin à l'occasion des problèmes de non-linéarité, ces deux catégories de conditions par ailleurs faciles à prendre en compte dans la résolution numérique des équations, permettent de traiter l'ensemble des problèmes pratiques se présentant en hydrogéologie.

### 2.5.1.3. Mise en œuvre du modèle de transfert souterrain

Les équations de diffusivité établies pour chacune des couches et munies de leurs conditions aux limites sont résolues numériquement par la méthode des différences finies grâce à la discrétisation en mailles carrées emboîtées, définie au chapitre 2, paragraphe 2. Cette méthode étant désormais classique, nous n'en évoquerons ici que le principe en priant le lecteur de se reporter à la réf. 16 pour plus de détails.

#### — Discrétisation des équations

La discrétisation des équations a pour objectif le remplacement du problème de la recherche d'une fonction charge hydraulique  $h(x, y, t)$  définie en chaque point du plan des couches et à chaque instant par celui de la recherche d'un nombre fini de fonctions du temps  $H_i(t)$  représentant la valeur moyenne de la charge sur chacune des mailles discrétisant le domaine souterrain.

La traduction pour chaque maille du principe de conservation de la masse d'eau au cours d'un mouvement régi par la loi de Darcy en fonction des inconnues  $H_i$  et des valeurs discrétisées des paramètres hydrodynamiques conduit à un système d'équations différentielles du premier ordre par rapport à la variable temps symbolisée par la relation matricielle :

$$TH = Q + a^2S \frac{dH}{dt}$$

où  $H$  est le vecteur charge hydraulique, vecteur de l'espace à  $n$  dimensions dont les composantes sont les valeurs moyennes de la charge prises dans l'ordre de la numérotation des mailles ;  $\frac{dH}{dt}$  en est la dérivée par rapport au temps,

$Q$  est le vecteur des débits imposés extérieurement (conditions aux limites),

$a^2S$  est une matrice diagonale contenant le produit du coefficient d'emménagement discrétisé par la surface de chaque maille,

$T$  est la matrice des transferts construite à partir des valeurs discrètes des transmissivités sur les mailles et des coefficients de drainance entre couches aquifères caractérisant les semi-perméables.

#### — Résolution des équations

Le système d'équations différentielles du premier ordre précédent, dont la solution fournit l'expression des valeurs discrètes de la charge sur les mailles en fonction du temps, est résolu, à chaque pas de temps, par la méthode itérative de la surrelaxation par points suivant un schéma explicite ou implicite pur selon la valeur du pas de temps choisi pour le calcul.

Cette méthode présente l'avantage de se prêter honorablement à tous les cas de figures concernant par exemple la forme du domaine modélisé ou la nature des conditions aux limites. S'agissant d'une méthode itérative, elle permet en outre de traiter assez facilement les cas de non linéarité qui sont la conséquence du couplage écoulements de surface-écoulements souterrains.

En contrepartie, comme avec toute méthode itérative, la résolution numérique du problème sera astreinte à des critères de convergence.

### 2.5.2. Le transfert dans les rivières

Le transfert en rivière effectue l'acheminement de l'eau produite par ruissellement à l'exutoire des sous-bassins de calcul en tenant compte des relations nappes-rivières.

L'algorithme de transfert considère le réseau hydrographique principal comme une arborescence de réservoirs ou biefs en relation éventuelle avec la nappe et se vidant les uns dans les autres de l'amont vers l'aval, suivant une loi de tarissement exponentielle définie par un coefficient de vidange.

#### 2.5.2.1. Constitution des biefs

Les biefs sont établis par le regroupement de mailles-rivières offrant à l'eau la même durée de trajet jusqu'à l'exutoire du bassin auquel elles appartiennent. Cette durée de trajet est exprimée en nombre entier de pas de temps choisis pour le calcul. L'organisation des biefs est donc fonction de la durée de ce pas de temps, qui sera précisée par la suite.

Le stock en eau de surface contenu à un pas de temps donné dans un bief est alors la somme des stocks en eau présents sur chacune des mailles rivières constituant le bief. Le transfert porte sur la quantité totale d'eau du bief et non pas sur les stocks individuels des mailles-rivières.

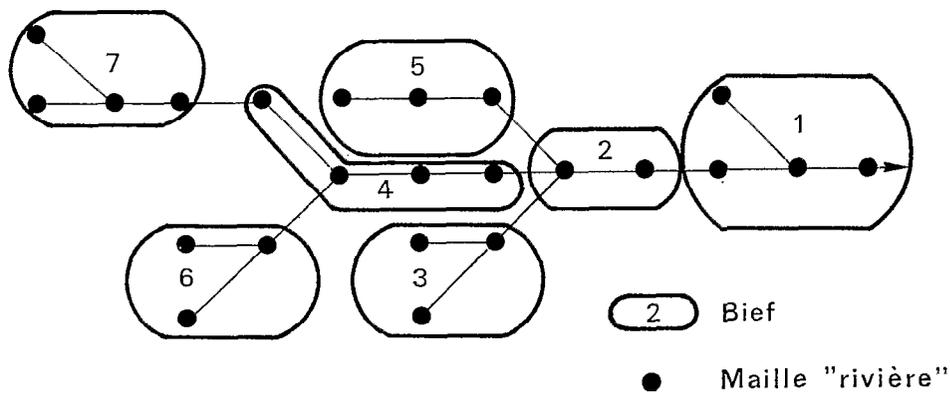


Fig. 18. — Principe de constitution des biefs

### 2.5.2.2. Algorithme de transfert

Le transfert est effectué de l'amont vers l'aval d'après la disposition en arbre d'écoulement des biefs, selon l'algorithme suivant intervenant à chaque pas de temps du calcul (cf. réf. 8 & 15).

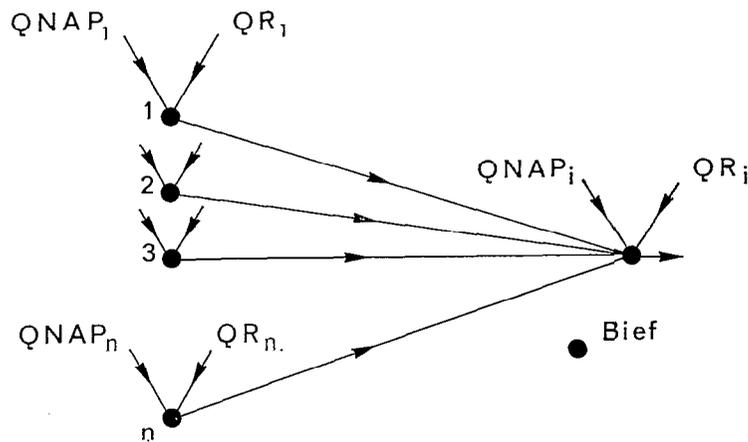


Fig. 19. — Schéma général de transferts entre biefs

Soit  $V_i^j$  le volume d'eau de surface stocké dans le bief  $i$  au pas de temps  $j$ . Ce volume au pas de temps  $j + 1$  devient :

$$V_i^{j+1} = (1 - XKB_i) (V_i^j + QR_i^j + QNAP_i^j) + \sum_{k=1}^{k=n} XKB_k (V_k^j + QR_k^j + QNAP_k^j)$$

où  $QR_i^j$  est la quantité d'eau disponible au pas de temps  $j$ , en provenance des sous-bassins ruisselant dans le bief  $i$ ,

$QNAP_i^j$  est la quantité d'eau échangée algébriquement entre le domaine souterrain et les mailles constituant le bief  $i$  au pas de temps  $j$ ,

$XKB_i$  est le coefficient de vidange du bief  $i$ ,  
l'indice  $k$  croît de 1 à  $n$  en désignant l'ensemble des biefs qui se vidangent directement dans le bief  $i$ .

Une fois le transfert entre biefs réalisé, le volume d'eau de chaque bief est à nouveau réparti dans les mailles rivières le constituant en vue du calcul des échanges nappes-rivières. Cette répartition est effectuée à l'intérieur d'un même bief et modulée de la façon suivante :

- proportionnellement à la longueur de la maille,
- en proportion inverse du coefficient de vidange de la maille,
- et enfin, proportionnellement au stock d'eau présent au pas de temps précédent dans l'ensemble des mailles rivières situées en amont de la maille considérée.

Cette répartition privilégie donc les mailles situées en aval du bassin et présentant une vidange lente. Il est de plus possible, par cette méthode, d'accepter un assèchement temporaire de certains tronçons des rivières suivant le régime hydraulique.

### 2.5.2.3. Calcul des coefficients de vidange

Dans le cas d'une loi de tarissement exponentielle, le coefficient de vidange d'une maille-rivière exprime la variation relative  $\Delta V/V$  du stock en eau  $V$  contenu sur cette maille pendant un pas de temps :

$$\Delta V = XKT \cdot V$$

L'expression de  $XKT$  peut être établie à partir de la loi de tarissement exponentielle choisie :

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha V \text{ conduisant à } \Delta V = (1 - e^{-\alpha \Delta t}) V$$

pendant le laps de temps  $\Delta t$  ; d'où :

$$XKT = 1 - e^{-\alpha \Delta t}$$

Il suffit donc de connaître  $\alpha$ , constante de temps du processus de vidange d'une maille, pour obtenir  $XKT$  quel que soit le choix du pas de temps du calcul.

En nous inspirant du programme CEQUEAU (réf. 9 ter), nous avons posé :

$$\alpha = \frac{a \cdot SBV}{SL}$$

expression dans laquelle

- $SBV$  est la surface du bassin versant amont de la maille considérée,
- $SL$  la surface de plan d'eau libre sur cette maille (rivières et éventuellement lacs),
- $a$  un paramètre de réglage jouant le rôle d'une constante de temps de dimension  $[T]^{-1}$ .

Dans ces conditions, la vidange d'une maille sera d'autant plus rapide ( $XKT \simeq 1$ ) que le bassin versant amont sera plus important et que la surface des plans d'eau libre sera plus petite. La valeur  $a = 0$  entraîne un coefficient  $XKT$  nul, donc une absence de vidange.

Les biefs étant composés en général de plusieurs mailles-rivières, nous avons admis que la loi de vidange d'un bief serait imposée par la maille présentant le tarissement le plus lent. On posera donc, pour le bief  $i$ , comportant  $p$  mailles rivières :

$$XKB_i = \min_{j=1, p} XKT_j$$

### 2.5.3. La relation nappe-rivière

La relation nappe-rivière règle la liaison entre le modèle de transfert souterrain et le modèle de transfert en rivière. Le couplage est effectué, pour chaque pas de temps du calcul, entre les mailles rivières de la couche de surface et les mailles des couches souterraines qui leur correspondent verticalement.

#### 2.5.3.1. Mécanisme de la relation nappe-rivière

Au niveau des rivières ou plans d'eau, deux situations hydrauliquement possibles (cf. Fig. 20) :

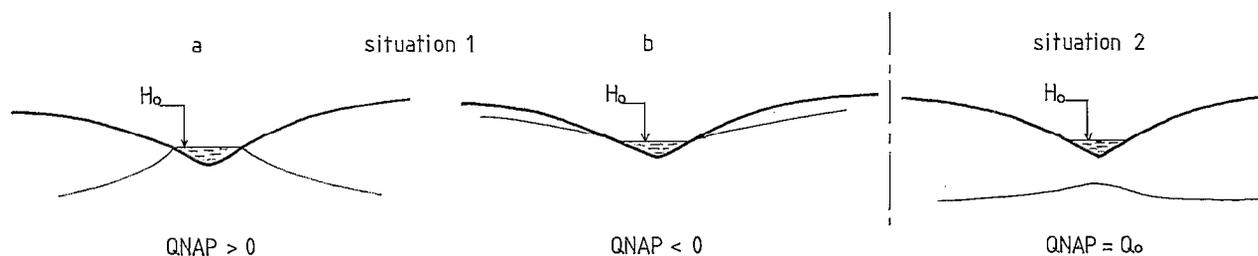


Fig. 20. — Schématisation de la relation nappe-rivière

— *Situation 1* : la rivière et la nappe sont connectées, la rivière imposant son niveau à la nappe moyennant une perte de charge plus ou moins intense à travers son lit. Le sens de circulation de l'eau peut éventuellement varier au cours du temps. Dans cette situation, nous calculerons le débit échangé au niveau d'une maille rivière par la formule :

$$QNAP = TP (H_0 - H)$$

avec  $H$  : niveau piézométrique de la nappe,

$H_0$  : niveau de la rivière,

$TP$  : coefficient de transfert réglant la perte de charge entre nappe et rivière ( $[L]^2 [T]^{-1}$ ),

$QNAP$  sera donc positif lorsque la circulation s'effectue de la rivière vers la nappe.

— *Situation 2* : la rivière et la nappe sont déconnectées par la présence entre elles d'une zone non saturée. Nous admettrons dans ce cas que le transfert s'effectue toujours dans le sens rivière-nappe avec une valeur  $Q_0$  connue de débit :

$$QNAP = Q_0$$

### 2.5.3.2. Conditions de non linéarité

Les variations annuelles du régime hydraulique du système modélisé produisent le plus souvent des changements de situation de la relation nappe-rivière. Ainsi, en période d'étiage prononcé des nappes, on pourra passer en continuité de la situation 1 à la situation 2, pour revenir à la situation 1 à l'occasion de la crue suivante.

De plus, le volume d'eau s'infiltrant en nappe, en provenance de la rivière, est évidemment limité sur un pas de temps par le volume d'eau disponible dans la maille rivière considérée.

Combinant l'ensemble de ces mécanismes, la fonction d'échange surface-souterrain sera traduite par la relation non linéaire suivante :

$$Q_{\text{rivière} \rightarrow \text{nappe}} = \text{minimum de } \begin{cases} QNAP = TP (H_0 - H) \\ Q_0 \\ QDIS \end{cases}$$

où  $QNAP$  est l'expression du débit dans la situation  $n_0 1$ ,

$Q_0$  la valeur du débit s'infiltrant à travers la zone non saturée,

$QDIS$  le débit moyen disponible en rivière sur un pas de temps.

### 2.5.3.3. Remarques sur les paramètres de la relation nappes-rivières

L'échange de l'eau entre les nappes et le réseau hydrographique principal est finalement régi par trois paramètres :

— le niveau de drainage  $H_0$ ,

— le coefficient de transfert  $TP$ ,

— le débit maximal d'infiltration  $Q_0$  à travers l'éventuelle zone non saturée entre la rivière et la nappe.

— Niveau de drainage

Le niveau de drainage représente le niveau du plan d'eau du réseau de surface en relation avec les nappes. Dans l'état actuel du modèle, ce niveau n'est pas relié au volume stocké dans les mailles rivières par souci de simplification. Ceci pourrait être fait sans grandes difficultés, la loi de variation hauteur-débit étant déduite des courbes de tarage disponibles sur le cours des rivières.

— Coefficient de transfert

Ce coefficient traduit l'aptitude de l'eau à traverser les horizons plus ou moins colmatés constituant le lit des rivières ou des plans d'eau. Il sera donc fonction de la perméabilité du lit et de la taille de la maille considérée. Il fera, la plupart du temps, l'objet d'un calage.

— Débit maximal d'infiltration

Ce débit représente à lui seul le comportement de la zone non saturée entre le fond de la rivière et la nappe. Il est donc, en toute rigueur, fonction de la perméabilité de cette zone et de la profondeur de la nappe. En l'absence de données précises, certainement difficiles à acquérir, nous nous contenterons de ce modèle grossier qui a au moins l'avantage d'être simple. La valeur du débit limite fera elle aussi l'objet d'un calage.

#### 2.5.4. Mise en œuvre des modèles de transfert

La mise en œuvre des modèles de transfert sur une période de simulation implique le choix préalable de plusieurs modes de discrétisation du temps, en rapport d'une part avec la nature des données physiques du problème et, d'autre part, avec la méthode de calcul numérique.

##### 2.5.4.1. Choix des pas de temps

Quatre catégories de pas de temps sont utilisées par le programme MODCOU :

— Pas de temps « météo »

C'est le pas de temps des données de précipitation dont nous avons parlé à propos du programme MODSUR. Cette discrétisation régulière sert de référence à toutes les autres. La durée d'une phase de calcul est, par exemple, définie par la donnée des numéros du premier et du dernier pas de temps météo à prendre en compte.

— Pas de temps « calcul »

Ce pas de temps est celui du calcul numérique, avec lequel sont mis en œuvre les différents algorithmes de transfert. Pour chacun de ces pas de temps seront effectués un transfert souterrain, un transfert de surface, un calcul de la relation nappe-rivière. Les résultats de la simulation, débits aux exutoires, débits aux stations hydro-métriques, variations des niveaux piézométriques, seront obtenus suivant cette discrétisation. Le pas de temps calcul est défini comme un multiple ou un sous-multiple du pas de temps météo. Cette faculté présente les avantages suivants :

- le mode de calcul peut s'adapter facilement à la variabilité temporelle des données ; les régimes rapidement variables tels que ceux qui présentent une forte participation du ruissellement justifieront l'emploi d'un pas temps court, par exemple égal au pas de temps météo, tandis que les régimes plus calmes pourront se contenter d'un découpage plus grossier du temps ;
- le calage du modèle est assuré au moindre coût. En effet, dans la première phase du calage, on s'attachera d'abord à vérifier l'ajustement en moyenne d'une année sur l'autre, sans chercher à exploiter l'ensemble de l'information contenue dans les données météorologiques. Un calcul avec un pas de temps regroupant plusieurs pas de temps météo sera généralement amplement suffisant. Des données journalières pourront, par exemple, être traitées au pas hebdomadaire ou décadaire ;
- le bilan hydrologique calculé par le programme MODSUR au pas de temps météo est complètement indépendant du calcul des transferts. Il en résulte que le choix du pas de temps calcul n'influe pas sur le réglage de la quantité globale d'eau écoulée aux exutoires.

— Pas de temps des données lentement variables : phase du calcul

La période totale de simulation est éventuellement découpée en phases dont la durée est exprimée en nombre entier de pas de temps « météo ». Cette discrétisation non nécessairement régulière permet d'atteindre deux objectifs :

- introduction de données plus lentement variables que les précipitations : paramètres hydrodynamiques, prélèvements en nappe, prélèvements en rivières, conditions aux limites, etc.
- édition et sauvegarde de résultats intermédiaires.

— *Pas de temps des données annexes*

Ce pas de temps, également exprimé en nombre de pas de temps « météo », traduit la fréquence d'actualisation de données au choix de l'utilisateur indépendamment de la discrétisation en phases de calcul. Cette option est plus particulièrement destinée au cas des phénomènes périodiques variant assez rapidement, dont la période et la phase ne correspondraient pas à celle des données météorologiques.

#### 2.5.4.2. Les données nécessaires

Les données nécessaires au déroulement du programme MODCOU concernent :

- les données hydrologiques,
- les données relatives au calcul numérique,
- les données organisant l'édition des résultats.

— *Données hydrologiques*

- Suivant le pas de temps « météo » : alimentation des nappes : volumes ruisselés à l'exutoire des sous-bassins, délivrés par le programme MODSUR (éventuellement suivi de NONSAT).
- Suivant la discrétisation en phases de calcul
  - données souterraines : transmissivités, coefficients d'emmagasinement, coefficients de drainance, coefficients de transfert nappe-rivière, prélèvements en nappe, niveaux piézométriques initiaux
  - données de surface : stocks initiaux en rivière, coefficients de vidange

— *Données relatives au calcul numérique*

- durée de la phase de calcul exprimée en nombre de pas de temps,
- durée du pas de temps de calcul,
- paramètres gouvernant l'exécution des algorithmes : critères de convergence, nombre maximal d'itérations.

#### 2.5.4.3. Les résultats

Les résultats obtenus concernent d'une part les phases de calcul, d'autre part l'ensemble de la période de simulation. Pour chaque phase, le programme édite sur option :

- un bilan du transfert souterrain par couche et/ou pour l'ensemble du système hydrogéologique,
- un bilan de surface,
- des tableaux de la piézométrie calculée et/ou des valeurs des différents paramètres utilisés,
- des cartes piézométriques et/ou des différents paramètres.

En fin de simulation est réalisé un bilan en eau global du système. Le programme prévoit également l'archivage sur fichier magnétique suivant le pas de temps du calcul des résultats suivants :

- débits aux exutoires des bassins,
- débits écoulés aux stations hydrométriques représentées par une sélection de mailles rivières,
- variations des niveaux piézométriques en un choix de mailles des couches souterraines.

Ces informations pourront être exploitées ultérieurement par des programmes de tracé.

### 2.5.5. Extensions et limites des modèles de transfert

Le choix des modèles de transfert, ainsi que celui des algorithmes qui en constituent la traduction mathématique, influent bien naturellement sur les possibilités d'extension ainsi que sur les limitations d'utilisation du modèle couplé. Après avoir tracé le canevas général du modèle, nous voudrions maintenant apporter quelques commentaires.

#### 2.5.5.1. Les problèmes de non linéarité

Nous avons déjà vu, au cours de la description de la fonction d'échange nappe-rivière, un exemple de cas de non linéarité. Deux autres exemples de ce type s'appliquant au domaine souterrain peuvent être facilement introduits dans le modèle. Il s'agit d'une part de la représentation des conditions aux limites de drainage, d'autre part des mécanismes de dénoyage des aquifères captifs.

##### — Conditions aux limites de drainage

Ce type de condition aux limites n'est autre qu'une adaptation et une simplification de la fonction d'échange nappes-rivières, qui a déjà été décrite. Il s'applique au cas où un aquifère se trouve en relation hydraulique avec un réseau de surface ne faisant pas partie du domaine simulé. Cette situation se rencontre, par exemple, lorsqu'une représentation acceptable des écoulements souterrains nécessite une grande extension des aquifères modélisés, alors que le domaine superficiel sur lequel on cherche à calculer le débit est d'emprise plus réduite. Un exemple de cette configuration sera rencontré lors de l'application du modèle au bassin du Caramy (Fig. 21) :

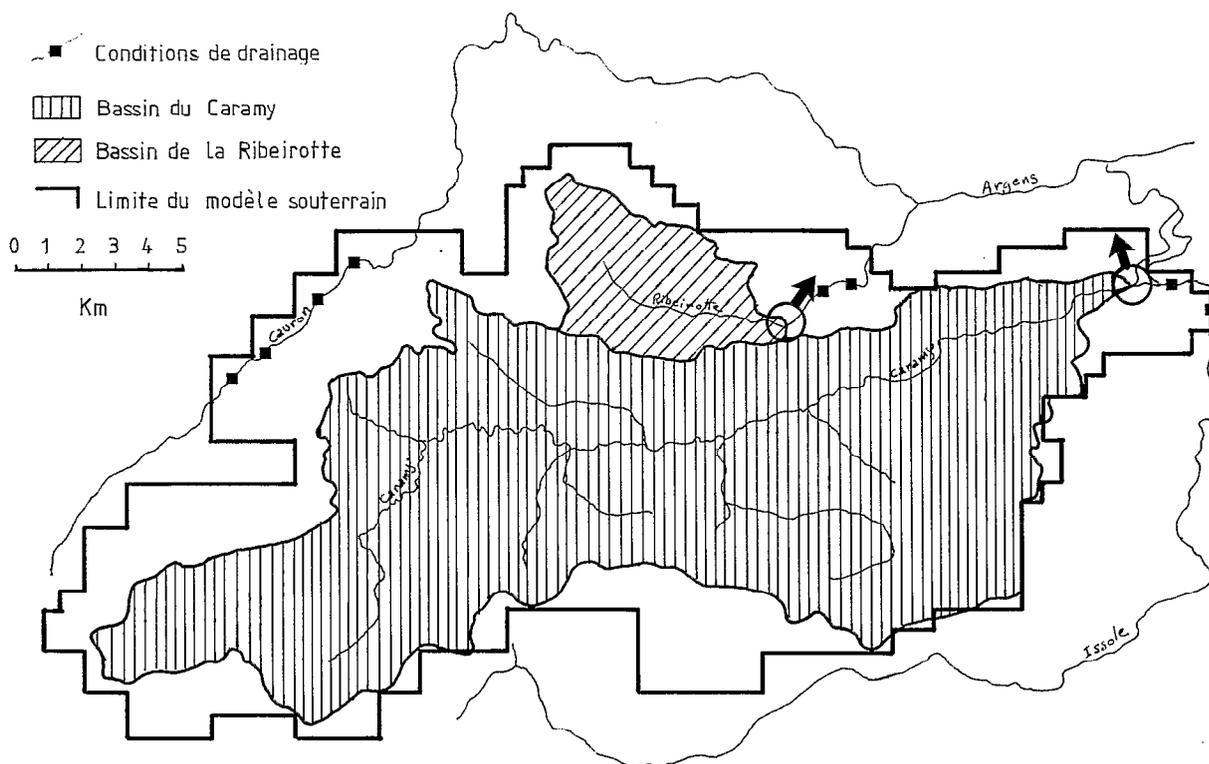


Fig. 21. — Exemple de conditions aux limites de drainage

Dans ces conditions, nous calculerons le débit échangé avec le milieu extérieur par la formule :

$$Q = \text{minimum de } \begin{cases} TP (H_0 - H) \\ Q_0 \end{cases}$$

les débits étant comptés positivement lorsque la circulation s'effectue de l'extérieur vers l'intérieur du modèle.

$H_0$  représente le niveau de drainage,

$H$  le niveau piézométrique de la nappe,

$TP$  est un coefficient de transfert,

$Q_0$  est une valeur limite du débit, par exemple le débit maximal infiltrable à travers une zone non saturée.

On constate que cette relation est identique à celle représentant les échanges nappe-rivière au détail près que la contrainte sur le volume disponible en surface disparaît, celui-ci n'étant pas calculé.

#### — Mécanismes de dénoyage des aquifères captifs

Le dénoyage d'un aquifère captif est observé lorsque son niveau piézométrique descend au-dessous de la cote du recouvrement semi-perméable de cet aquifère. La désaturation de la partie supérieure de l'aquifère entraîne alors les effets suivants :

- les mécanismes d'emmagasinement de l'eau dans l'aquifère changent de nature. La libération de l'eau par décompression du fluide et de la matrice rocheuse devient négligeable devant la vidange par égouttage des horizons supérieurs de la nappe ;
- la diminution de l'épaisseur mouillée peut produire une variation de la transmissivité ;
- enfin, le gradient vertical de charge dans le semi-perméable supérieur devient indépendant du niveau piézométrique dans l'aquifère entraînant une modification du calcul de la drainance.

Nous considérerons que ces mécanismes sont réversibles et que l'état initial est retrouvé lorsque la surface piézométrique remonte au-dessus du toit semi-perméable. Ces manifestations, qui provoquent une modification des valeurs des paramètres selon l'état du système, introduisent donc des conditions de non linéarité.

La traduction mathématique de ces mécanismes est faite de la manière suivante (Fig. 22) :

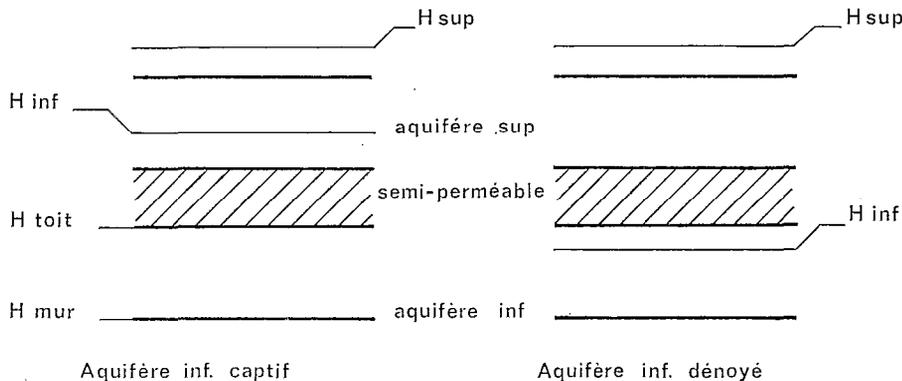


Fig. 22

#### — Aquifère captif

- coefficient d'emmagasinement :  $S = S_0 \text{ captif } (\sim 10^{-4})$
- transmissivité :  $T = T_0$
- drainance :  $q_{sup} = TH (H_{sup} - H_{inf})$

#### — Aquifère dénoyé

- coefficient d'emmagasinement :  $S = S^1 (\sim 10^{-1})$
- transmissivité :  $T = T_0 \frac{H_{inf} - H_{mur}}{H_{toit} - H_{mur}}$
- drainance :  $q_{sup} = TH (H_{sup} - H_{toit})$

# GEOCOU

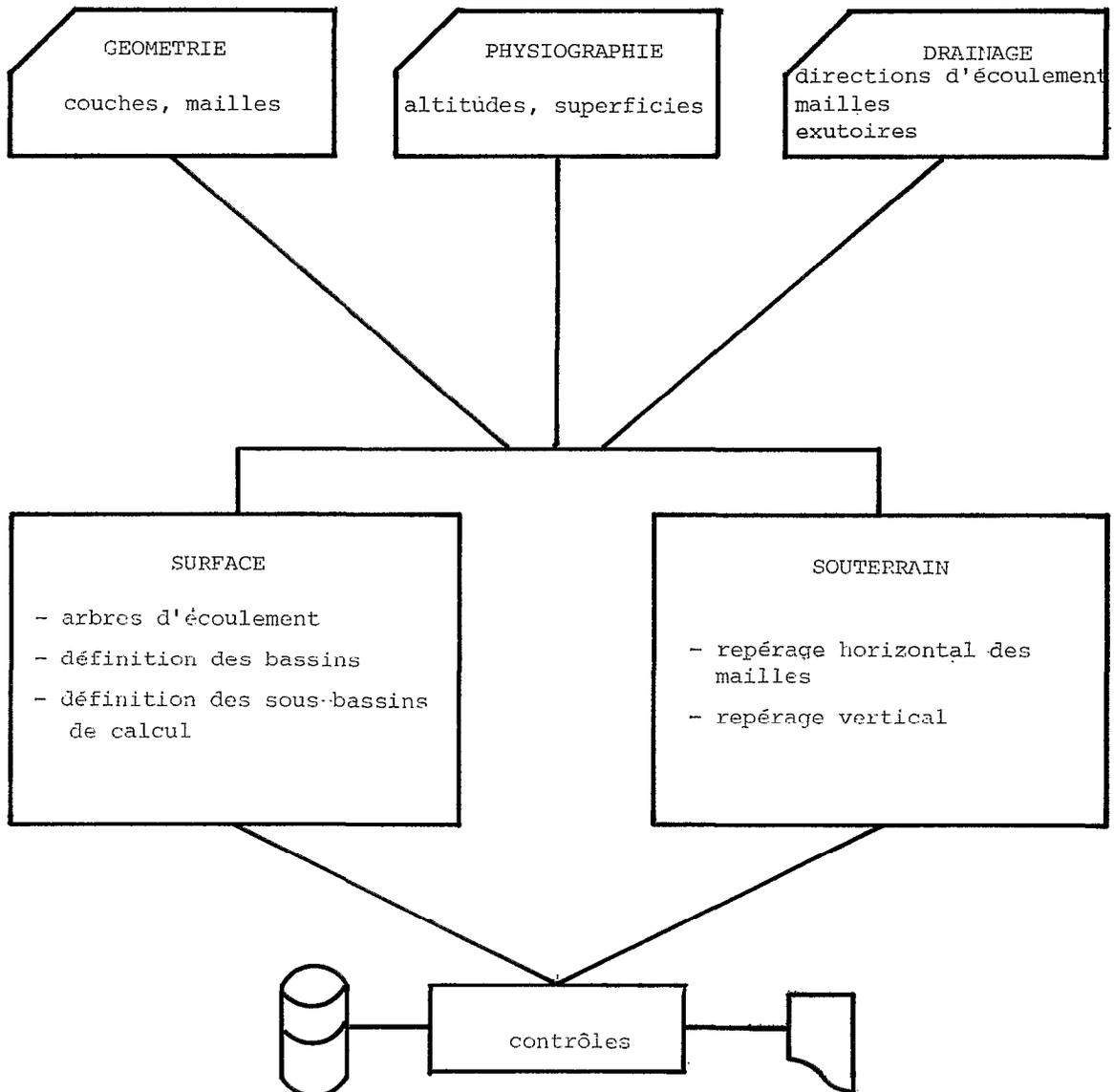


Fig. 23

# MODSUR

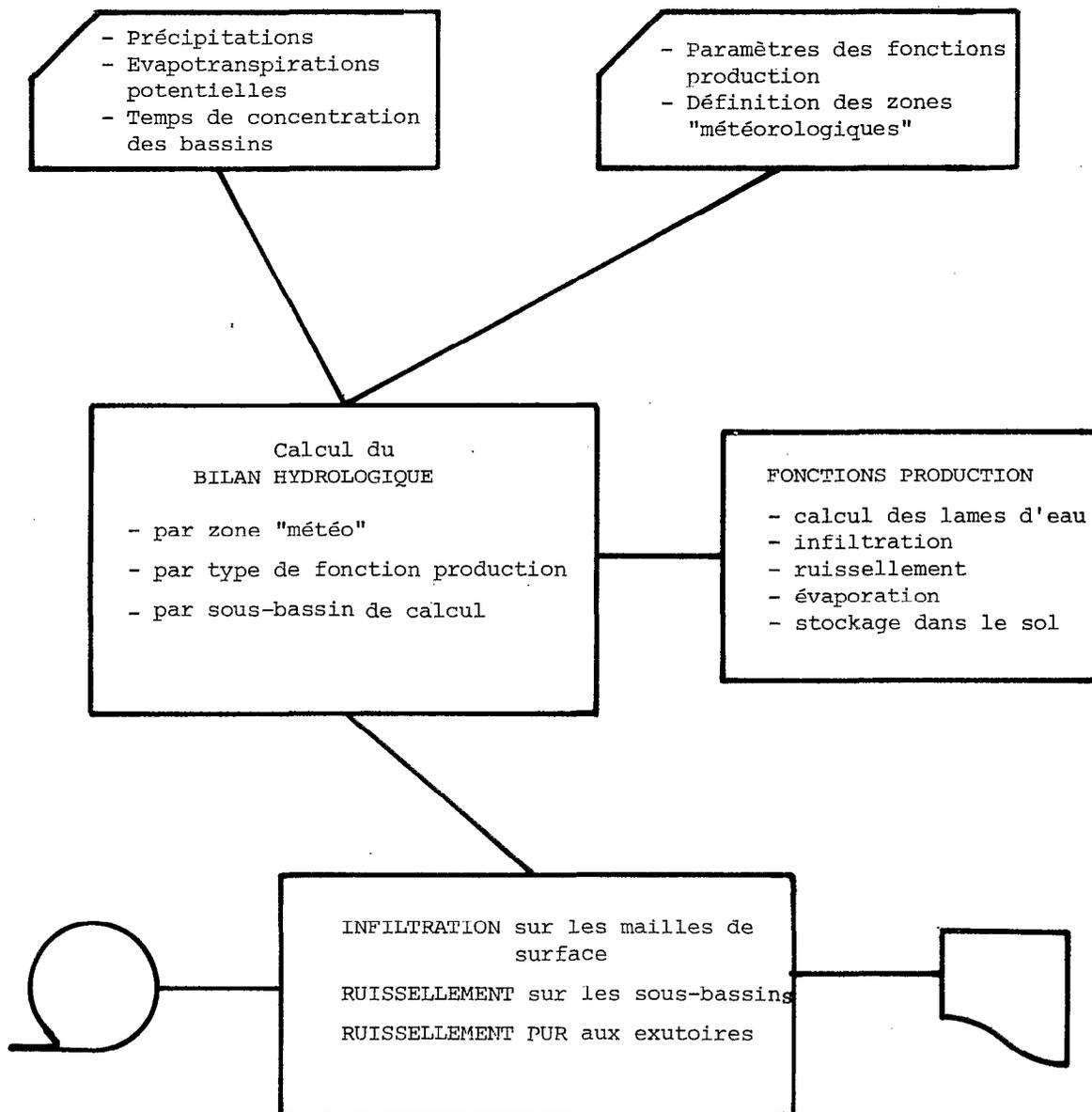


Fig. 24

# NONSAT

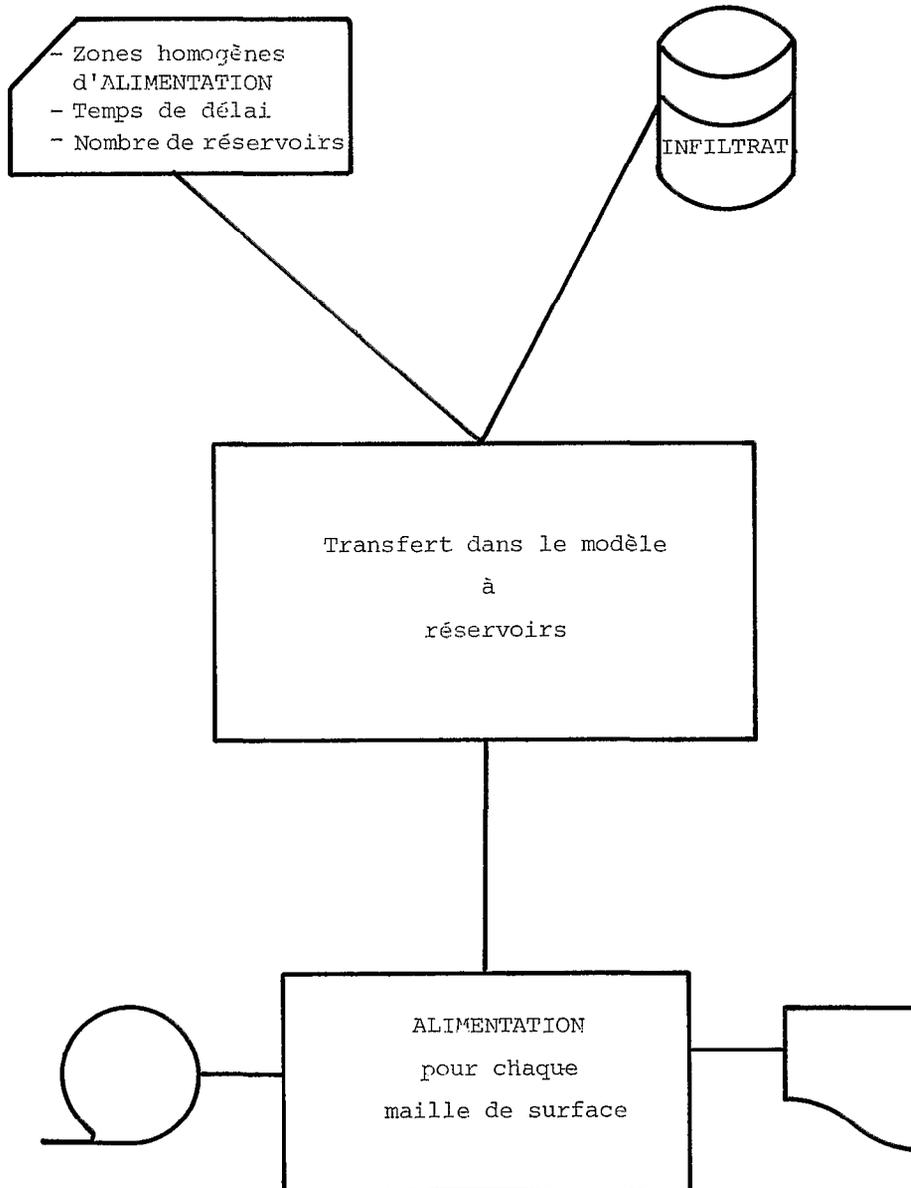


Fig. 25

# MODCOU

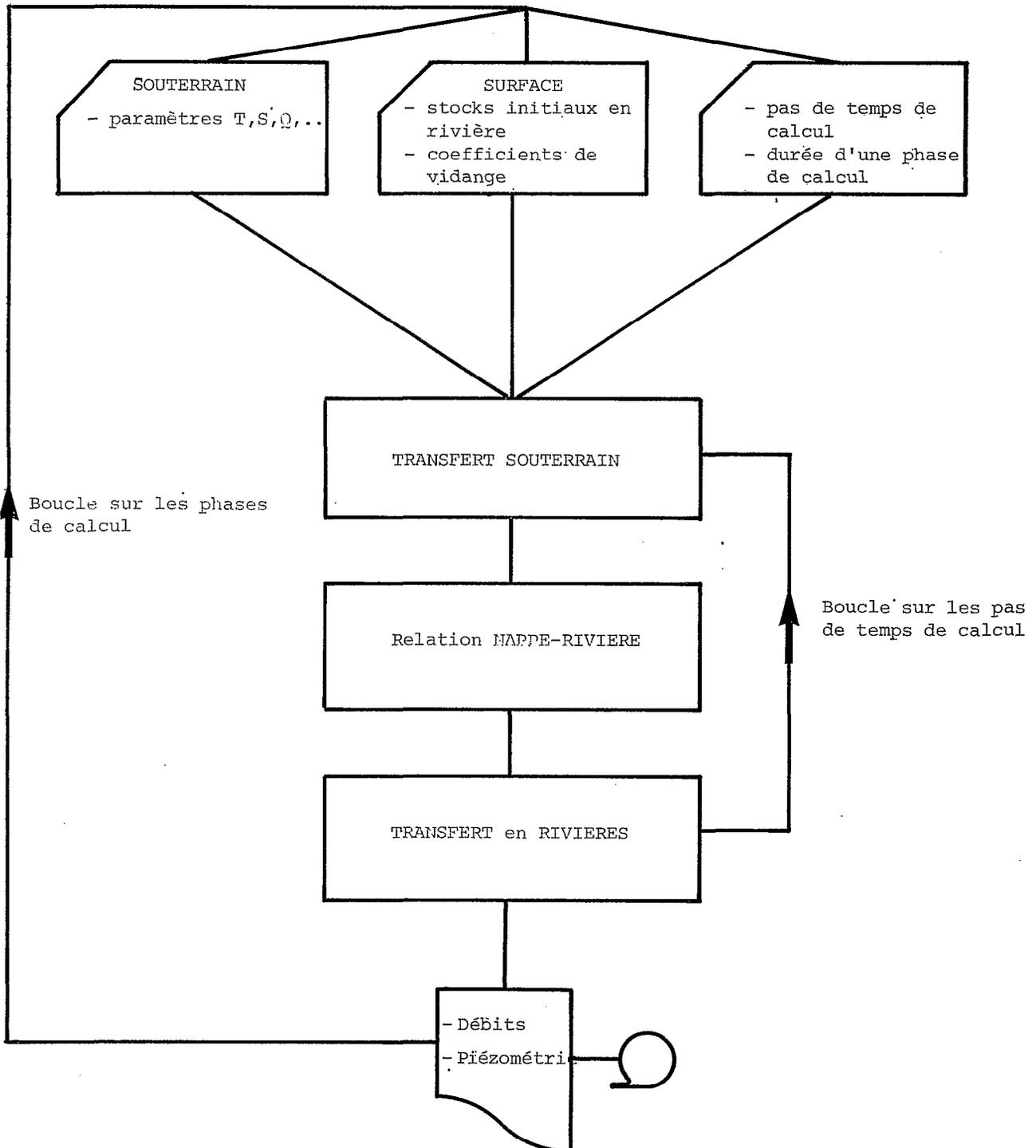


Fig. 26

### 2.5.5.2. Les problèmes de rapport entre la discrétisation spatiale et la discrétisation temporelle

Ces problèmes concernent principalement la simulation des écoulements de surface. En effet, la majorité des modèles à discrétisation spatiale, c'est en particulier le cas du programme CEQUEAU, adaptent l'algorithme de transfert au maillage utilisé. Cette méthode est certainement la plus satisfaisante pour l'esprit, mais présente l'inconvénient de conduire à employer des pas de temps souvent fort petits qui ne sont d'une part pas compatibles avec les données et, d'autre part, augmentent le volume des calculs. Le programme CEQUEAU, qui était plus particulièrement destiné à être utilisé au Québec avec des mailles de 10 km de côté, n'a posé que peu de problèmes, car un pas de temps journalier était généralement compatible avec une telle discrétisation spatiale.

Dans le cas du modèle couplé, nous avons voulu combiner la souplesse d'emploi procurée par une discrétisation quelconque des données et un temps de calcul raisonnable, c'est pourquoi nous avons adopté la démarche suivante : la discrétisation spatiale en maille sert uniquement à la saisie des données physiographiques et à la définition des arbres d'écoulement. Cette discrétisation est ensuite modifiée par regroupement de mailles au niveau de l'algorithme de transfert. On crée ainsi les zones isochrones sur les sous-bassins et les biefs sur les rivières, suivant les exigences du pas de temps du calcul choisi. La durée des calculs ainsi économisée peut être très grande, mais se pose alors le problème du passage des paramètres d'un mode de discrétisation à l'autre.

Cette difficulté se traduirait, dans le cas où l'on souhaiterait faire dépendre les caractéristiques de l'écoulement en rivière des volumes d'eau stockée, par exemple en introduisant des lacs de barrage à superficie variable.

Des aménagements du modèle sont donc encore certainement nécessaires, mais ne pourront être efficacement réalisés qu'à l'occasion d'applications pratiques.

## 2.6. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

En guise de conclusion de ce second chapitre consacré aux principes de construction du modèle couplé nous reprendrons l'articulation des différentes opérations effectuées par le modèle sous forme d'organigrammes généraux (Fig. 23-24-25-26).

## 3. APPLICATION DU MODÈLE COUPLÉ SUR LES BASSINS DE LA HAUTE-LYS (PAS-DE-CALAIS) ET DU CARAMY (VAR)

L'objectif est à présent de montrer la méthode de mise en œuvre du modèle couplé sur deux exemples français.

Le premier bassin étudié est celui de la Haute Lys dans le Nord de la France, où ont été représentées les relations entre le cours amont de la rivière Lys et deux nappes souterraines assez homogènes sises dans la craie, sur une superficie d'environ 85 km<sup>2</sup>.

Le second bassin est situé dans le Sud, et concerne la rivière Caramy qui recoupe sur 250 km<sup>2</sup> de nombreux aquifères constitués par les formations secondaires très tectonisées de l'anticlinal de Brignoles.

Ces deux exemples montreront comment deux structures, bien que d'échelles comparables, peuvent être différentes dans leur complexité, et comment le modèle couplé peut en rendre compte.

Une description assez détaillée de la mise en œuvre du modèle sera donnée pour le bassin de la Haute Lys. On se bornera, par contre, seulement à mettre en relief les particularités rencontrées sur le bassin du Caramy. L'accent sera mis dans le cadre de cet article sur les méthodes et non sur les réponses aux questions qui avaient motivé les études.

### 3.1. LE BASSIN DE LA HAUTE-LYS

L'agglomération lilloise a pu être alimentée en eau potable jusqu'en 1963 uniquement par des eaux souterraines prélevées dans les diverses nappes existant dans ses environs, et représentées essentiellement par la nappe de la Craie et celle du Calcaire Carbonifère.

Devant la croissance des besoins, il a fallu créer une usine de traitement des eaux de la rivière la Lys située en amont d'Aire-sur-la-Lys (Pas-de-Calais) dans un secteur encore relativement peu pollué du système hydrologique de la région.

Conformément aux besoins à moyen terme de la Métropole du Nord, la capacité de traitement de cette usine s'élève à 100.000 m<sup>3</sup>/j, ce qui est bien supérieur au débit de la rivière en étiage qui est de l'ordre de 30.000 m<sup>3</sup>/j. Dès la conception du projet, il avait donc été prévu de renforcer ce débit d'étiage en faisant appel à différentes solutions telles que :

- la création d'un barrage en amont de la prise d'eau, projet vite abandonné étant donné la faible capacité des sites explorés et la perméabilité des terrains crayeux, sans compter l'immobilisation d'espaces au sol ;
- le transfert d'eau à partir d'une autre rivière, projet qui, en plus de difficultés techniques liées à la baisse du débit occasionnée sur un autre bassin versant, devait rencontrer également des difficultés politiques ;
- le pompage saisonnier dans la nappe de la Haute Lys et le rejet des eaux pompées dans la rivière.

C'est l'étude de ce dernier projet, coordonné par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, qui a motivé l'étude par modèle mathématique des écoulements souterrains sur le bassin (réf. 1). L'emploi du modèle couplé pour représenter la modification du régime d'écoulement naturel de la rivière induite par les pompages en nappe en constitue un des aspects.

### 3.1.1. Hydrogéologie du bassin de la Haute Lys

La Lys et son affluent principal, la Traxenne, forment à Ligny un bassin versant d'environ 85 km<sup>2</sup> (cf. Fig. 27). Ce bassin recouvre en partie la nappe de la Craie, surmontant elle-même les schistes, à intercalations gréseuses du Primaire, qui en constitueront le substratum imperméable.

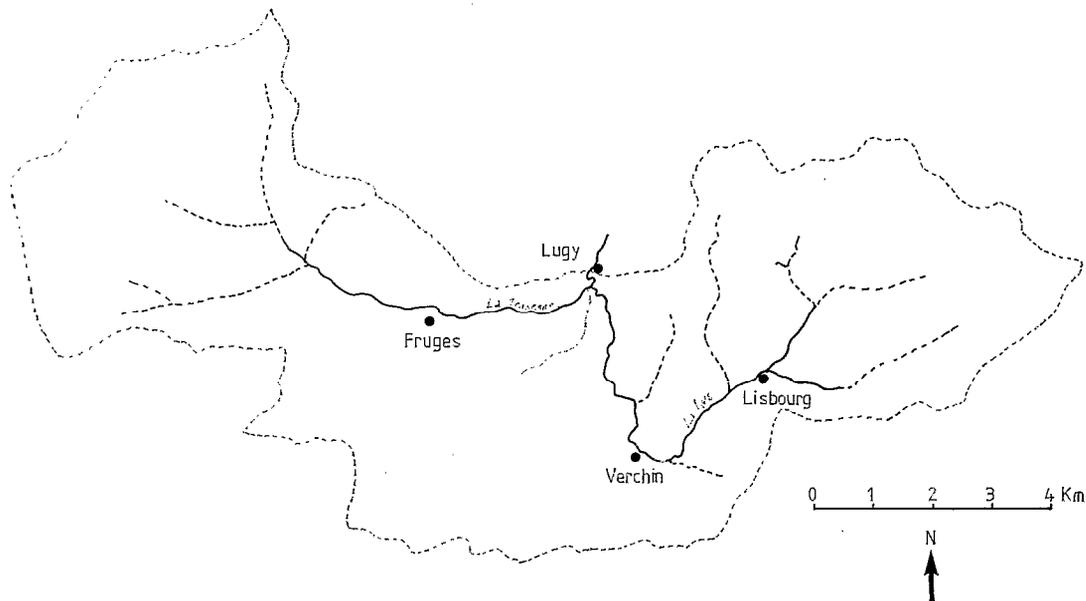


Fig. 27. — Bassin versant de la Haute-Lys à Ligny

Les différents travaux entrepris sur l'hydrogéologie de la région permettent de distinguer une entité céno-maniennne alimentée par drainance à partir du Turonien moyen. La nappe du Turonien émerge dans les vallées sous forme de sources diffuses à tarissement rapide. Les émergences naturelles du Cénomaniennne présentent, au contraire, des débits réguliers intervenant à l'aval de Fruges sur le cours de la Traxenne et de Verchin sur celui de la Lys. Au nord, l'ensemble de la nappe de la Craie se trouve borné par le Primaire imperméable et s'écoule donc entièrement vers la Lys qui draine finalement l'ensemble des écoulements superficiels et surtout souterrains du bassin.

L'étude des différents faciès de la Craie dans la région du Nord établie d'après des corrélations entre forages, utilisant de nombreuses diagraphies et mesures au micromoulinet, conduit à distinguer trois horizons continus dans la Haute Lys (réf. 3) :

- le Turonien moyen, alternances de craie et de marnes,
- le Turonien inférieur, marnes plastiques crayeuses,
- le Cénomanién, alternances de craie et de marnes.

Le Turonien inférieur sera considéré par la suite comme une zone peu perméable (semi-perméable) interposée entre la nappe du Cénomanién et celle du Turonien moyen. La présence de cet horizon peu perméable justifiera l'intérêt de capter la nappe du Cénomanién en amont du bassin, là où les échanges nappe-rivière se trouveront ainsi moins affectés par les pompages.

Comme cela est le plus fréquent, les limites du bassin de surface et du bassin souterrain ne coïncident pas. De plus, les fluctuations piézométriques importantes observées, pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres (Fig. 28), laissent présager que l'extension relative de ces bassins sera variable au cours du temps, nécessitant donc de repousser les limites de l'étude hydrogéologique jusqu'aux cours d'eau principaux des bassins adjacents. Le domaine de travail sera ainsi étendu sur près de 350 km<sup>2</sup> jusqu'à l'Aa et le Surgeon au nord et la Ternoise au sud.

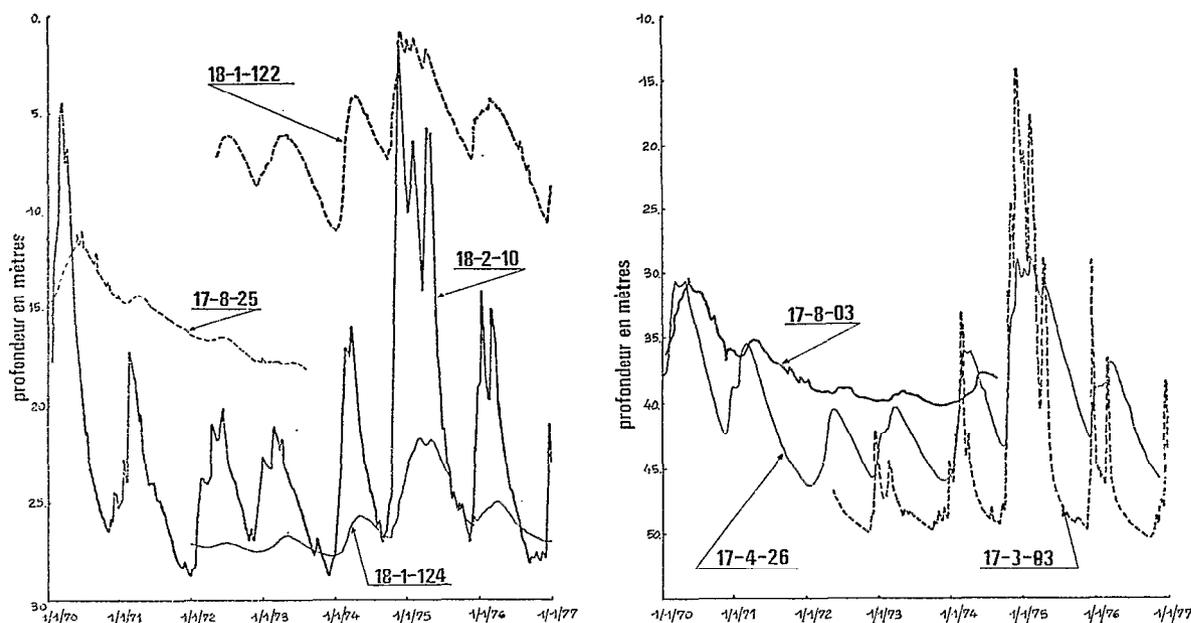


Fig. 28. — Fluctuations piézométriques sur le bassin de la Lys

### 3.1.2. Modélisation des écoulements

Comme cela a déjà été dit, notre modélisation s'appuie essentiellement sur les résultats de l'étude réalisée pour le compte de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (Réf. 1). Nous examinerons successivement les données disponibles, le modèle souterrain et, enfin, le modèle de surface.

#### 3.1.2.1. Données disponibles

Outre les informations sur la structure géologique du bassin dont il a déjà été fait état, il sera fait usage des données quantitatives suivantes :

### Mesures piézométriques

Des cartes piézométriques précises ont été établies pour les dates suivantes :

Octobre 1967  
Juillet 1970  
Décembre 1971  
Mars 1976  
Octobre 1976

Le réseau de surveillance régulière (hebdomadaire) comprend 27 piézomètres implantés dans la nappe du Turonien et dans celle du Cénomanién. Nous en retiendrons 16 pour notre étude, possédant un historique d'observations de plusieurs années (1972-78) avec, il est vrai, un certain nombre de manques. Leur implantation est représentée sur les Fig. 29 et 30.

### Mesures hydrométriques

Les mesures disponibles portent uniquement sur la Lys et la Traxenne et concernent les stations suivantes, repérées sur la Fig. 31 :

- Lys 10 : source de la Lys
- Lys 13 : Lys à Verchin
- Lys 17 : Lys en amont du confluent avec la Traxenne
- Lys 34 : source de la Traxenne
- Lys 50 : Traxenne à l'amont du confluent avec la Lys
- Pont de Luyg : Lys au pont de Luyg.

Cette dernière station contrôle la quasi-totalité des émergences de la Haute Lys, et constituera le point de calage situé le plus en aval de notre modèle.

Des valeurs journalières, avec quelques manques, ont été rassemblées en ces six stations entre 1972 et 1978.

Aucune mesure n'était disponible sur les bassins versants adjacents.

### Données météorologiques

Les postes pluviométriques de Fruges et de Fiefs intéressant respectivement 75 et 25% du bassin, seront considérés comme représentatifs de notre domaine d'étude. On disposera de données journalières entre 1972 et 1978.

L'évapotranspiration potentielle sera prise en valeurs mensuelles moyennes sur 1969-1978 calculées par la méthode de Thornthwaite à partir de températures mesurées à Boulogne.

### Prélèvements en nappe

Hormis l'alimentation en eau des cressonnières, les prélèvements sont actuellement négligeables sur le bassin. Environ 50 forages artésiens de cressonnières ont été recensés, exhaurant un débit estimé à 300 m<sup>3</sup>/h en 1969.

### Paramètres hydrodynamiques

Quelques rares valeurs sont disponibles déduites d'essais de pompage ou d'interprétation de variations naturelles de niveaux piézométriques. La détermination des paramètres hydrodynamiques sera donc essentiellement effectuée par calage du modèle souterrain.

#### 3.1.2.2. Le modèle souterrain

##### Domaine modélisé

Le modèle considère deux couches d'extension voisine représentant les nappes du Turonien moyen, couche supérieure, et du Cénomanién, couche inférieure. Ces couches sont connectées entre elles par des échanges hydrauliques verticaux figurant la drainance.

La zone d'étude s'étend sur près de 350 km<sup>2</sup> ; elle est centrée sur la région de Fruges-Verchin, et contient ainsi le bassin de la Lys jusqu'à Dennebroeuq. Elle atteint les limites hydrauliques du système constituées par les cours d'eau des bassins adjacents, à savoir :

- l'Aa, au nord-ouest, entre Verhocq et Reuty,
- la Ternoise, au sud-est, entre Anvin et Auchy-les-Hesdin,
- la Planquette à Fressin, la Créquoise à Torcy, au sud-ouest,
- enfin, la Laquette à Bomy et le Surgeon à Fléchin, dans le nord-est.

Entre ces cours d'eau figurant les limites naturelles, le modèle s'appuiera sur des lignes de courant de la nappe de la Craie parcourant les interfleuves.

#### *Maillage*

La discrétisation du plan des nappes comprend quatre niveaux de découpage utilisant des mailles carrées de 1 250 m, 625 m, 312 m, et 156 m. Les éléments les plus fins du maillage sont utilisés pour représenter l'axe drainant de la Lys et de la Traxenne, alors que de grandes mailles permettent d'atteindre les limites hydrauliques hors du bassin versant. 1 321 mailles sont nécessaires à cet objectif, dont 618 pour le Turonien moyen et 703 pour le Cénomaniens (cf. Fig. 29 et 30).

#### *Représentation des conditions aux limites*

La Lys, la Traxenne, ainsi que les petits affluents de leur cours amont seront représentés par une zone de drainage dont les débits seront récupérés dans les « mailles rivières » du modèle de surface, permettant ainsi la simulation du débit en un point quelconque de ces deux cours d'eau.

Les rivières figurant les limites hydrauliques des nappes seront, elles, traitées comme des conditions de drainage simple sans possibilité de simulation du débit écoulé en chaque point.

Les interfleuves seront supposés non influencés par les conditions régnant sur le bassin de la Lys, et seront représentés comme des limites à flux nul (Fig. 29 et 30).

### 3.1.2.3. Le modèle de surface

#### *Domaine modélisé, maillage*

Le domaine de surface représenté par le modèle recouvre la totalité de la nappe du Turonien moyen et une partie de la nappe du Cénomaniens là où elle devient affleurante dans la vallée de la Lys en aval de Verchin. Ce domaine, qui déborde donc largement du bassin de la Lys-Traxenne, est discrétisé en 424 mailles de 1 250, 625 et 312 m de côté, les petites mailles servant à s'adapter au mieux à la discrétisation fine du secteur Traxenne-Lys nécessitée par la représentation des échanges surface-souterrain (Fig. 31). L'ensemble représente 325 km<sup>2</sup>.

#### *Réseau de drainage, réseau hydrographique principal*

Parmi les 20 exutoires figurant l'aboutissement des arborescences représentant le réseau de drainage de surface (Fig. 31), nous retiendrons seulement la maille 14 comme exutoire du système Lys-Traxenne appartenant au domaine modélisé.

81 mailles seront sélectionnées comme « mailles-rivières » parmi lesquelles se placeront les six stations hydro-métriques dont le débit sera calculé par le modèle :

#### *Zones météorologiques*

Deux zones déterminées par la méthode de Thiessen correspondant aux postes pluviométriques de Fruges et de Fiefs seront envisagées (Fig. 31).

#### *Fonctions production*

Compte tenu de l'occupation et du type de sol, nous avons choisi a priori d'introduire cinq catégories de fonctions production affectées à chacune des mailles de la surface d'après la carte topographique au 1/25 000, à savoir :

- sol de cultures ou prairies 251 km<sup>2</sup>,
- sol couvert de forêts occupant 18,5 km<sup>2</sup>,
- sol couvert de taillis occupant 55 km<sup>2</sup>,
- sol imperméable occupant 0,1 km<sup>2</sup>,
- sol marécageux occupant 0,5 km<sup>2</sup>.

Ces cinq catégories seront traitées au moyen de la fonction production standard définie dans le second chapitre.

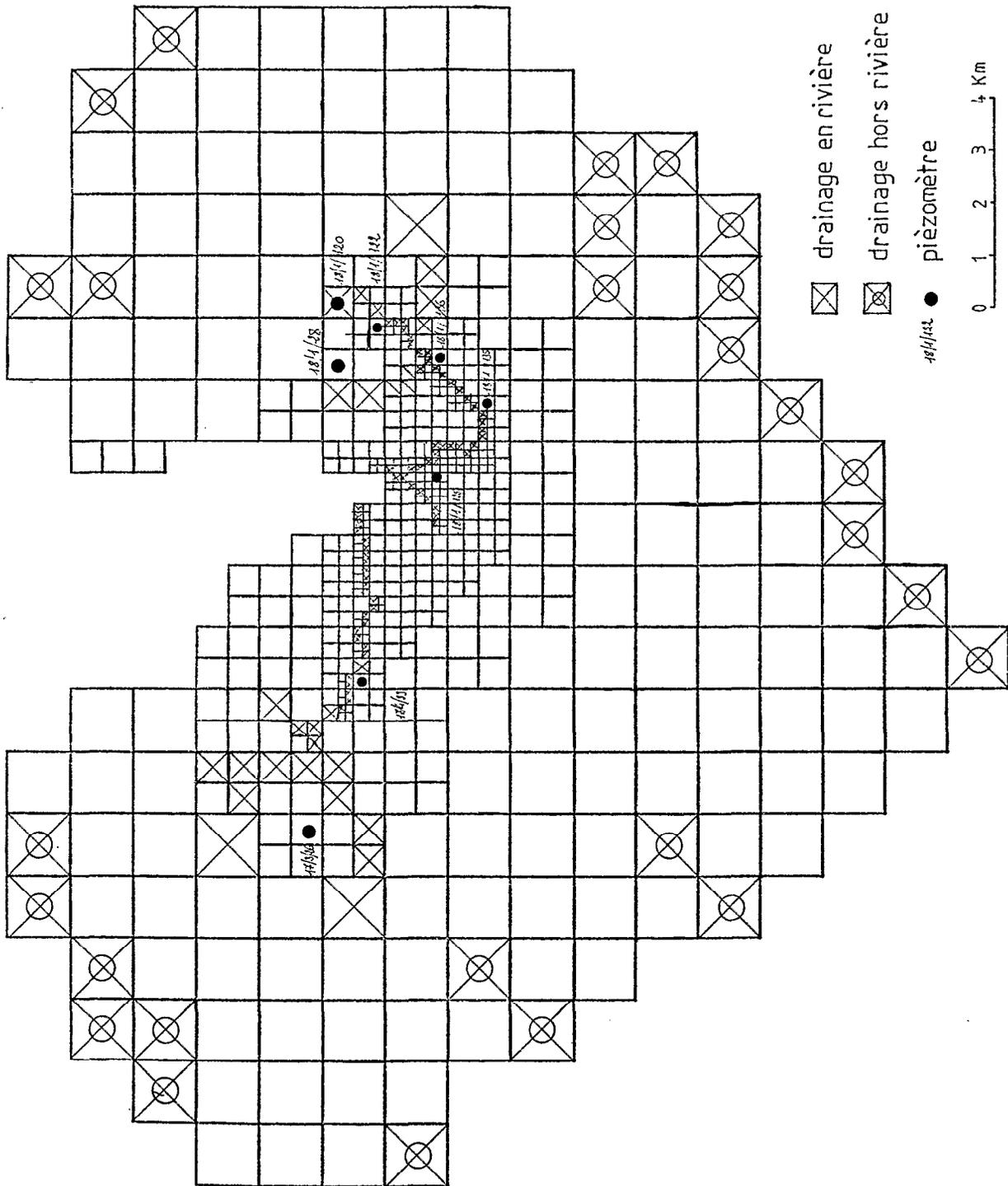


Fig. 29. — Discretisation de la nappe du turonien moyen

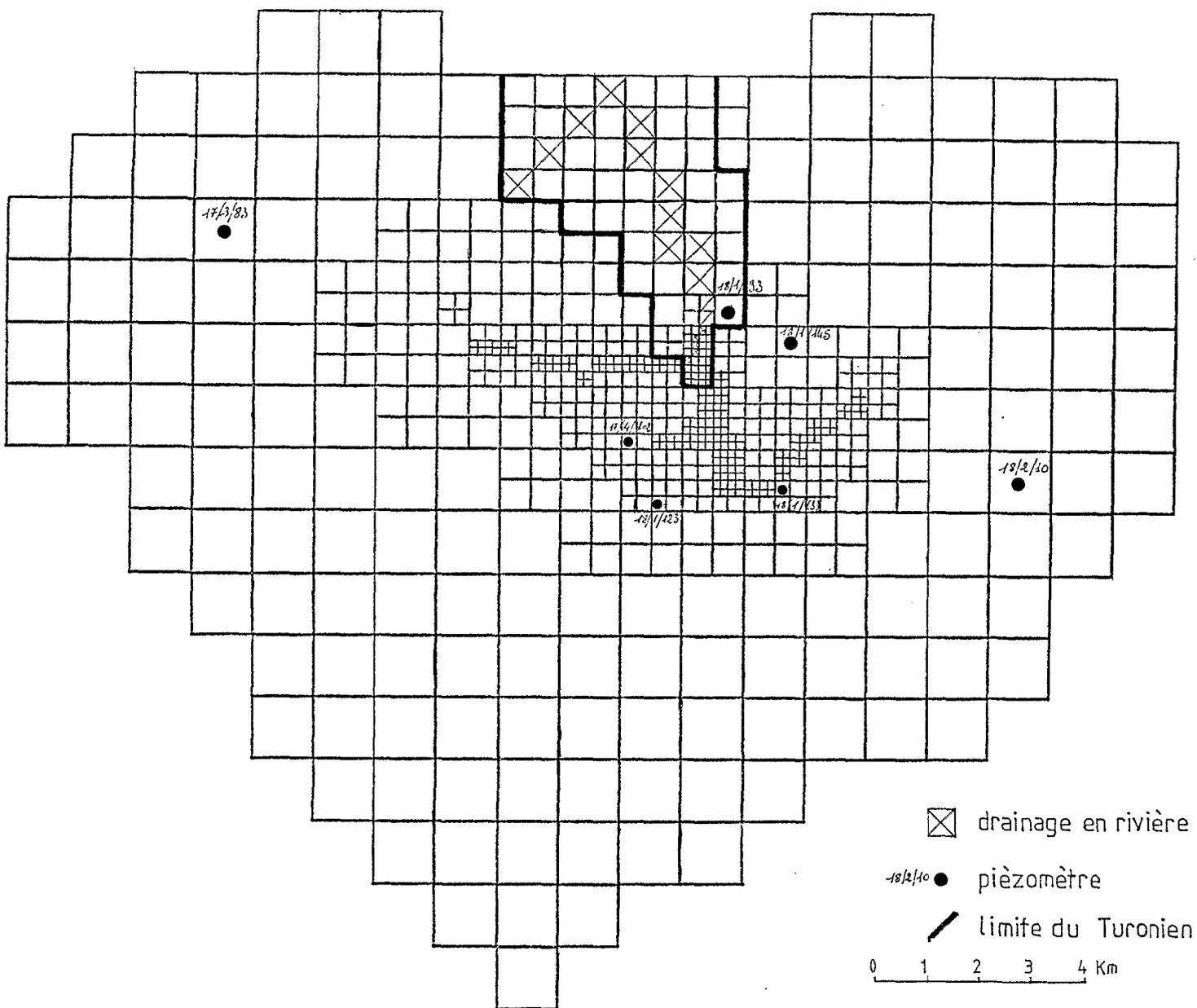


Fig. 30. — Discretisation de la nappe du cénonanien

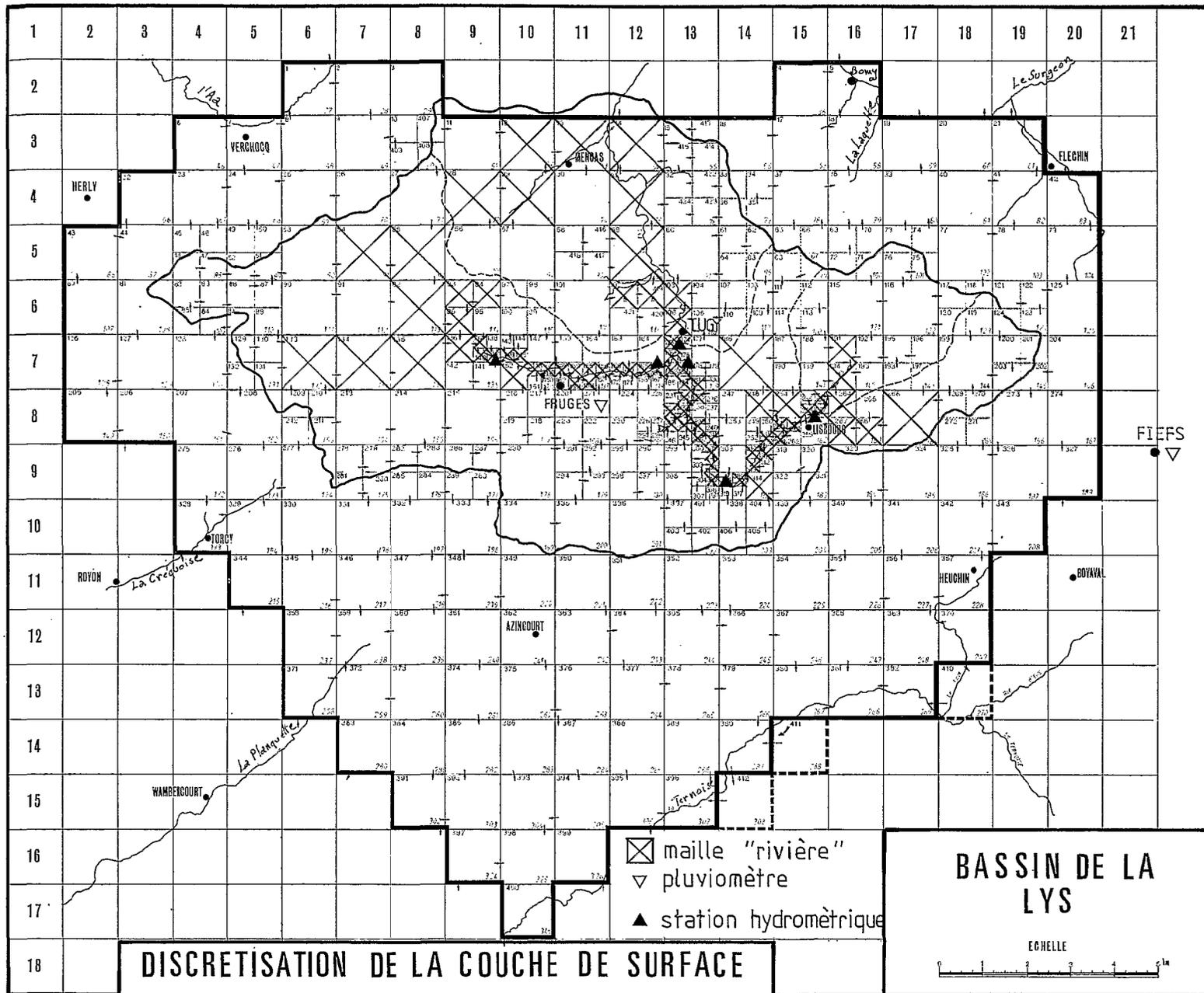


Fig. 31

Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique

### 3.1.3. Mise en œuvre du modèle

La méthode a comporté quatre étapes :

- calage du modèle souterrain en régime permanent,
- calage du modèle souterrain en régime transitoire non influencé,
- ajustement des fonctions production,
- calibrage des fonctions de retard.

#### 3.1.3.1. Calage du modèle souterrain en régime permanent

Le calage des transmissivités et des coefficients de drainance a été réalisé en régime permanent sur un étiage représenté par l'état de la nappe relevé en Décembre 1971. La méthode consiste à rechercher par tâtonnements, en se guidant sur les informations de terrain quantitatives et qualitatives, le jeu de paramètres permettant de restituer au mieux l'état piézométrique choisi ainsi que les débits drainés par la Lys à la même époque. Le choix, comme état de référence, d'une situation de fin d'étiage prononcé permet de s'affranchir de la connaissance du terme d'emmagasinement de l'équation de diffusivité ainsi que de minimiser l'incertitude sur l'appréciation de l'alimentation.

Cette alimentation a pu être estimée en remarquant que la superficie du bassin versant souterrain occupait, à cette époque, les 2/3 de celle du bassin superficiel. Le débit de la Lys s'élevant à 380 l/s pour la période de référence, le débit d'alimentation moyen s'établissait à 6,75 l/s/km<sup>2</sup> en supposant sa répartition uniforme sur l'ensemble du domaine modélisé.

#### 3.1.3.2. Calage des coefficients d'emmagasinement en régime transitoire non influencé

L'utilisation d'une période de régime transitoire non influencée, c'est-à-dire en l'absence d'alimentation, permet une première approche des coefficients d'emmagasinement si l'on connaît le champ de transmissivité. Le tarissement de l'année 1975 d'Avril à Octobre a été retenu dans ce but, le calage ayant pu être effectué sur une vingtaine de relevés piézométriques et sur les débits de la Lys.

#### 3.1.3.3. Ajustement des fonctions production

Ce calage est tout d'abord effectué globalement en comparant année par année sur la période 1972-1978 les débits calculés et mesurés à Lugy, point d'observation le plus en aval du bassin.

Remarquons qu'une première approche de cet ajustement peut être et doit même être effectuée très tôt dans le déroulement de la modélisation, avant même que le modèle souterrain ne soit complètement calé. Le résultat en est, en effet, relativement indépendant ; totalement indépendant en ce qui concerne le ruissellement ; légèrement dépendant pour l'infiltration dans la mesure où la superficie du bassin versant souterrain peut varier avec les caractéristiques des nappes.

Les meilleurs résultats obtenus au Pont de Lugy sont consignés dans le tableau suivant :

Volumes (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	Total période
Mesurés	13,6	13,6	23,1	36,4	18,1	25,2	26,3	156,3
Calculés	13,3	14,3	21,7	34,8	18,1	27,3	28,6	158,1

#### Volumes écoulés au Pont de Lugy en 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>

On constate que la reconstitution du volume écoulé est excellente sur l'ensemble de la période. De plus, en valeur annuelle, l'écart absolu ne dépasse pas 8%.

Le ruissellement sur l'ensemble de la période représente moins de 1% du volume écoulé, ce qu'il est difficile de confirmer par les observations, étant donné la faible valeur, mais semble vraisemblable.

Les paramètres des fonctions production ayant conduit à ce résultat sont donnés dans le tableau suivant :

	DCRT (mm)	CRT (mm)	FN (mm/j)
Sol défriché	10	60	30
Forêts	10	80	30
Taillis	10	60	30
Marais	100	150	10
Imperméable	10	50	10

Rappelons que DCRT et CRT caractérisent le bilan hydrique, et que FN règle l'infiltration de l'eau disponible à la sortie du réservoir de bilan. Etant donné le faible rôle du ruissellement, nous n'avons pas introduit, pour la simulation, de réservoir de transfert du ruissellement.

Remarquons enfin que l'effet dominant est produit par les fonctions production « sol défriché » et « taillis » qui occupent plus de 90% de la superficie. Le calage a donc porté essentiellement sur ces deux catégories de fonctions, les autres s'en déduisent d'après ce que l'on peut en attendre a priori.

#### 3.1.3.4. Calibrage des fonctions de retard

Nous avons cherché à approcher au mieux au moyen du modèle à réservoirs (modèle de Nash) constituant le programme NONSAT, les fonctions de retard déterminées, pour 10 zones homogènes d'alimentation (Fig. 32) suivant la méthodologie décrite dans les principes du modèle, et proposée par M. Besbes (réf. 2). L'ajustement porte, pour chaque zone, sur deux paramètres :

- TAU : temps de délai des différents réservoirs lié à la perméabilité de la zone non saturée,
- N : nombre de réservoirs figurant l'épaisseur de cette zone non saturée.

Les résultats obtenus sont reproduits dans le tableau suivant :

Numéro de la zone d'alimentation	Nombre de réservoirs	Temps de délai (jours)
1	5	20
2	3	22
3	1	21
4	2	20
5	2	18
6	2	10
7	2	6
8	2	9
9	2	10
10	5	21

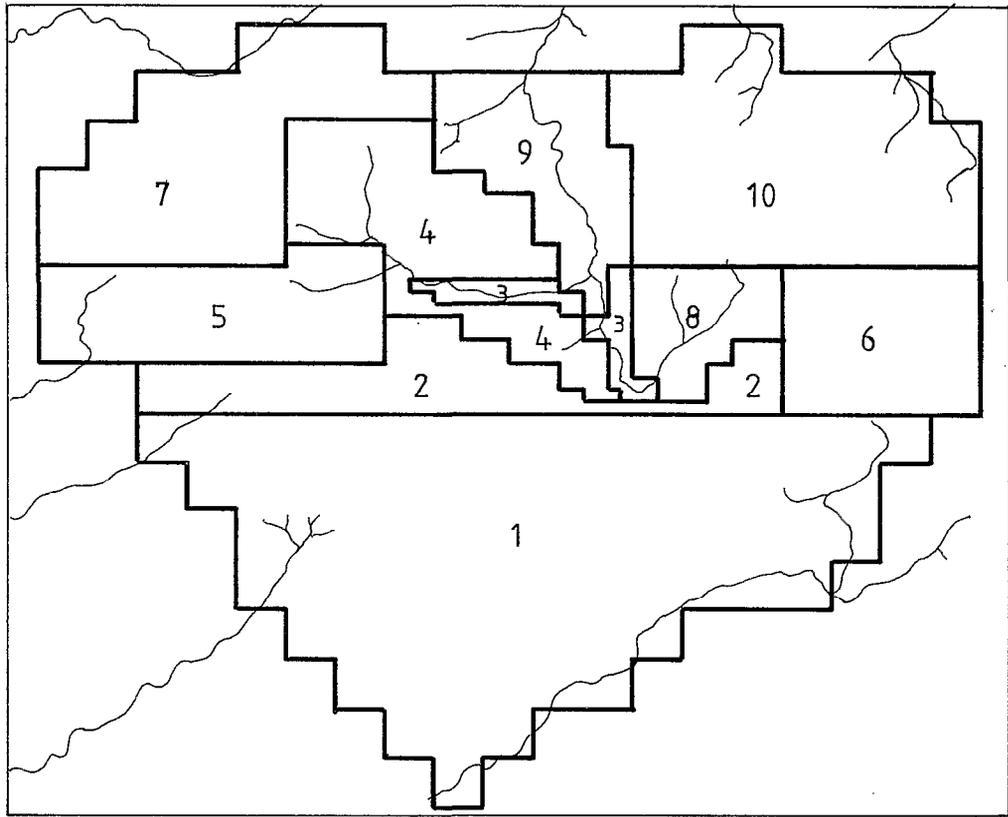


Fig. 32. — Définition des 10 zones homogènes d'alimentation du souterrain

#### 3.1.4. Simulation d'un historique de référence

Dans les conditions qui viennent d'être décrites, nous avons entrepris la simulation des débits aux stations hydrométriques présentes sur le bassin, ainsi que celle des variations piézométriques. Le calcul a été mené avec un pas de temps décadaire sur l'ensemble de la période recouvrant les années 1972 à 1978. Les résultats obtenus font l'objet des Fig. 33 et 34.

On constate une bonne reproduction des débits au Pont de Lugy comme cela était prévisible, étant donné le calage des fonctions production réalisé. La qualité de l'ajustement se détériore à mesure que l'on remonte vers l'amont des cours d'eau ; ce fait est particulièrement notable pour la station Lys 34, source de la Traxenne, dont les débits sont manifestement surestimés.

La reconstitution des variations piézométriques est convenable, attestant la qualité du calage du modèle souterrain.

En conclusion, le modèle couplé, dans la mesure où il rassemble une représentation détaillée des écoulements souterrains à l'échelle régionale, un modèle de calcul de l'infiltration ainsi qu'une méthode de prise en compte du retard à l'infiltration, s'adapte bien aux problèmes de simulation à dominante souterraine.

La possibilité de simuler, au sein d'un même modèle, l'ensemble des ressources d'un bassin hydrologique permet un ajustement cohérent du bilan hydrique de surface et des transferts souterrains qui facilite l'approche du modéliste et renforce la confiance que l'on peut accorder au modèle.

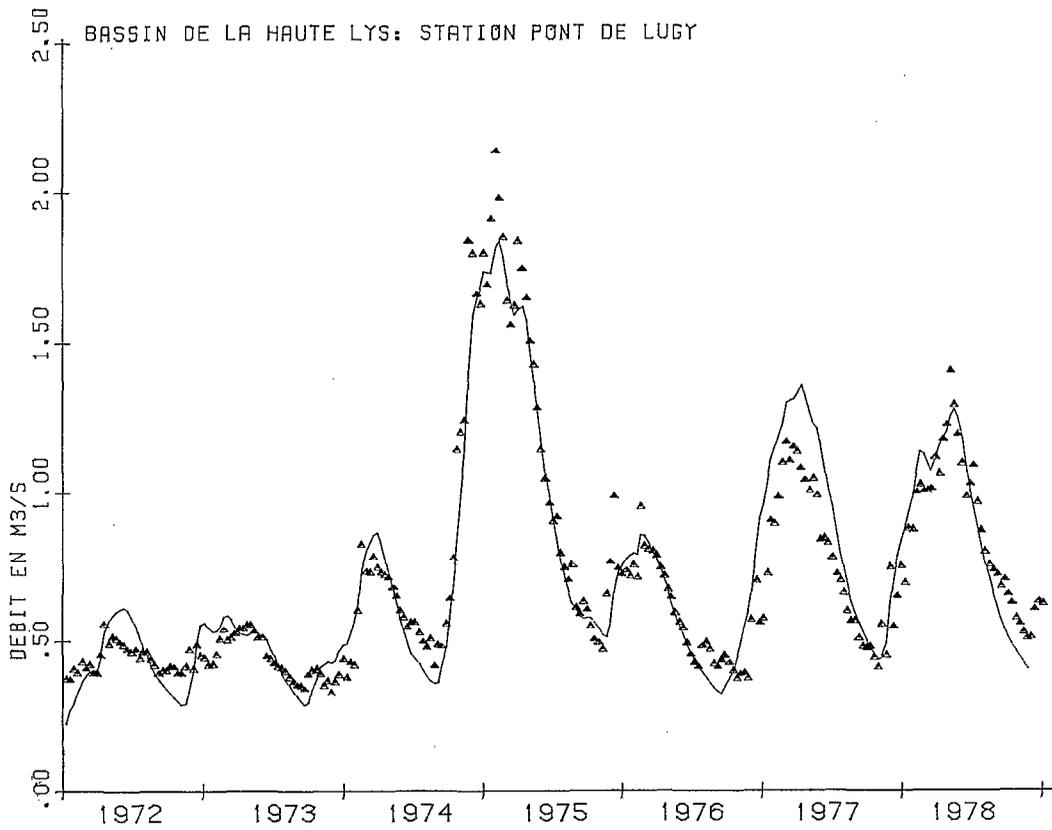


Fig. 33 a. — Reconstitution des séries hydrométriques

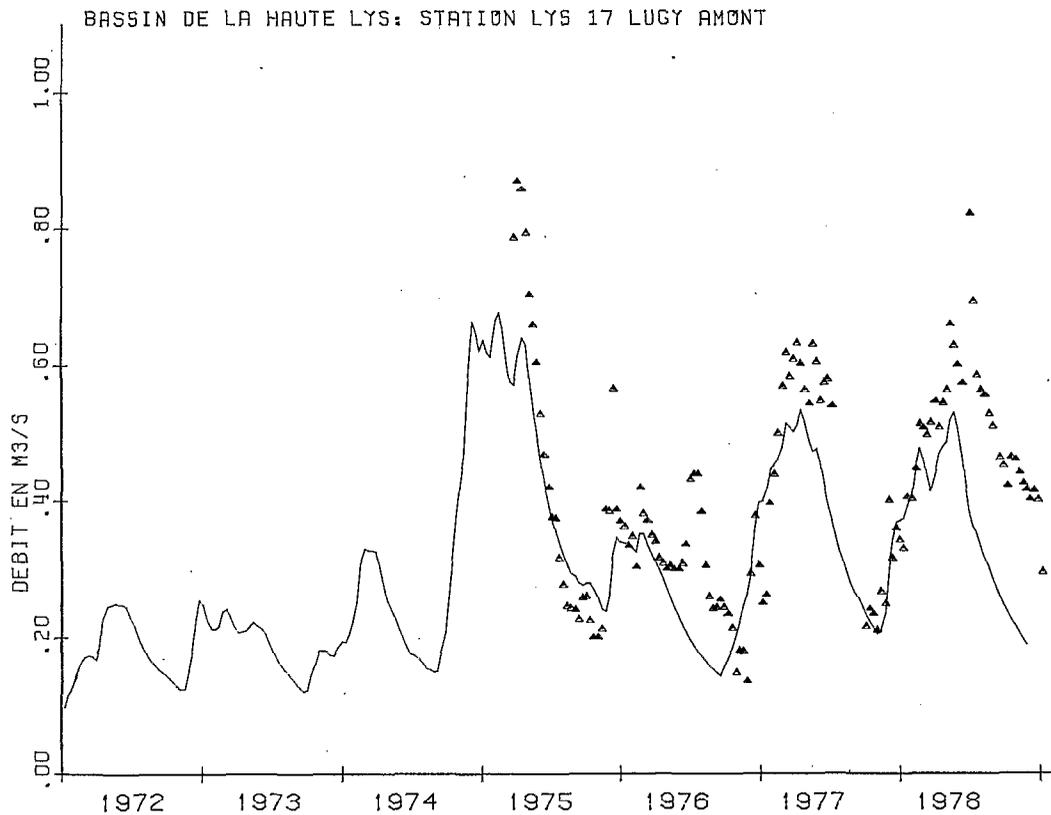


Fig. 33 b. — Reconstitution des séries hydrométriques

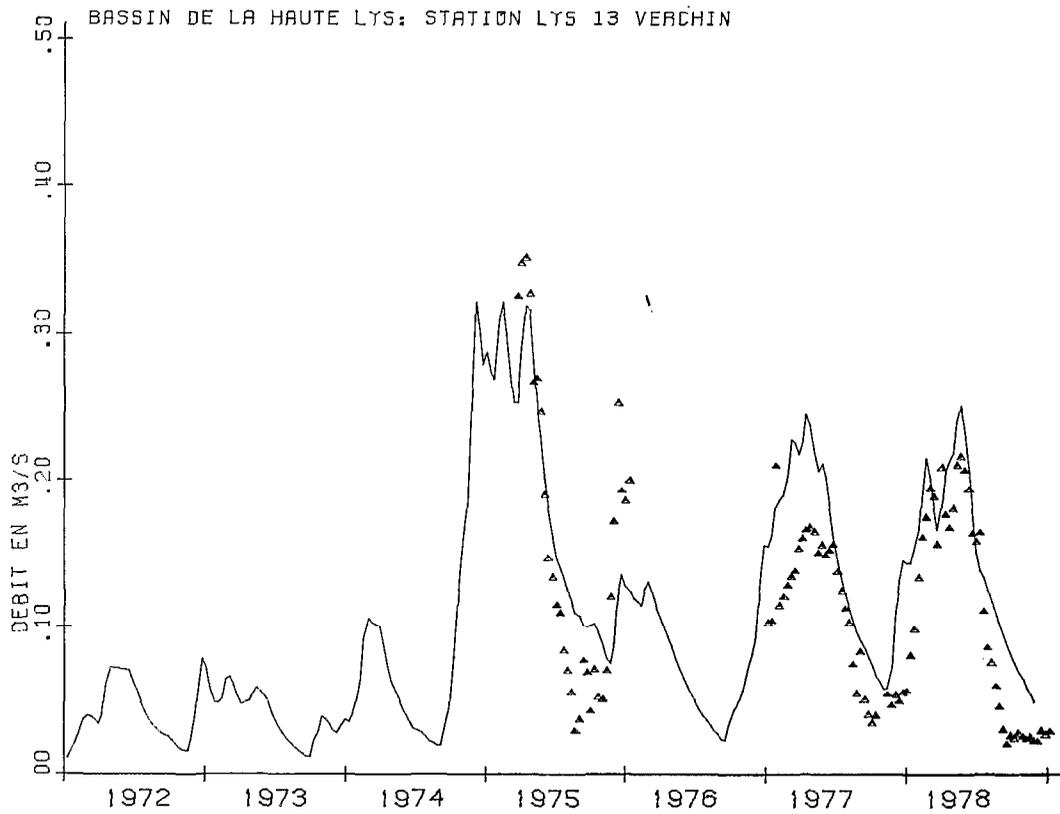


Fig. 33 c. — Reconstitution des séries hydrométriques

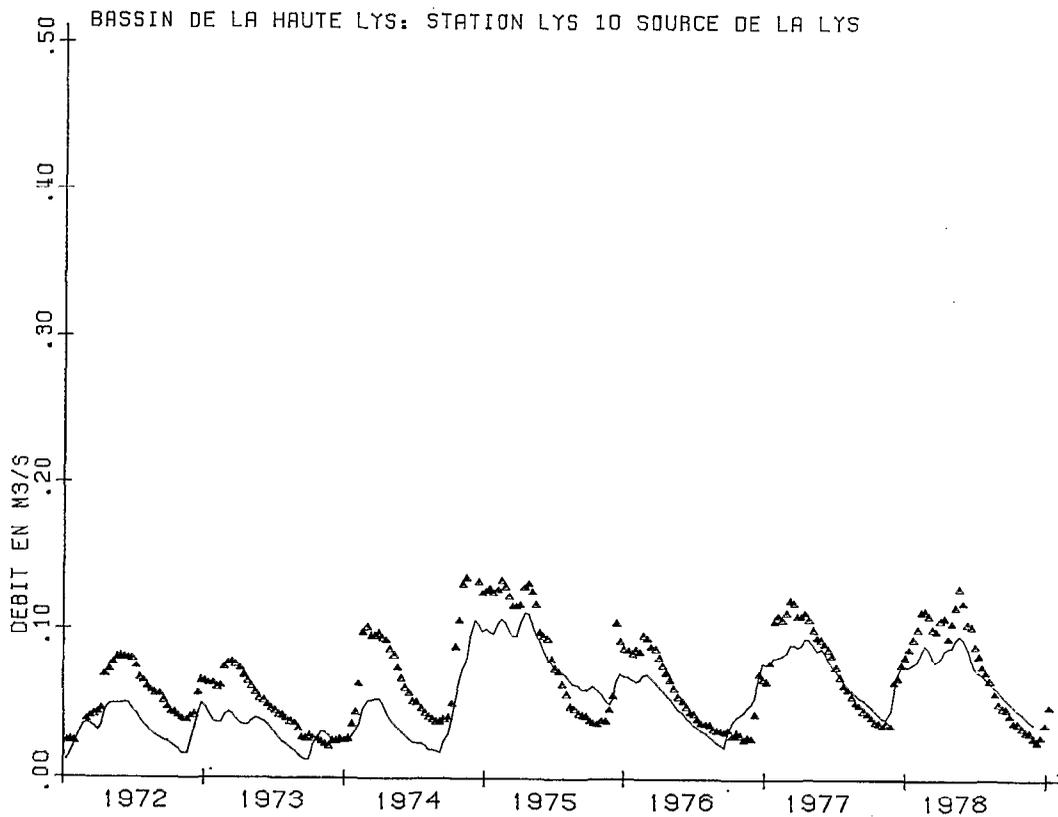


Fig. 33 d. — Reconstitution des séries hydrométriques

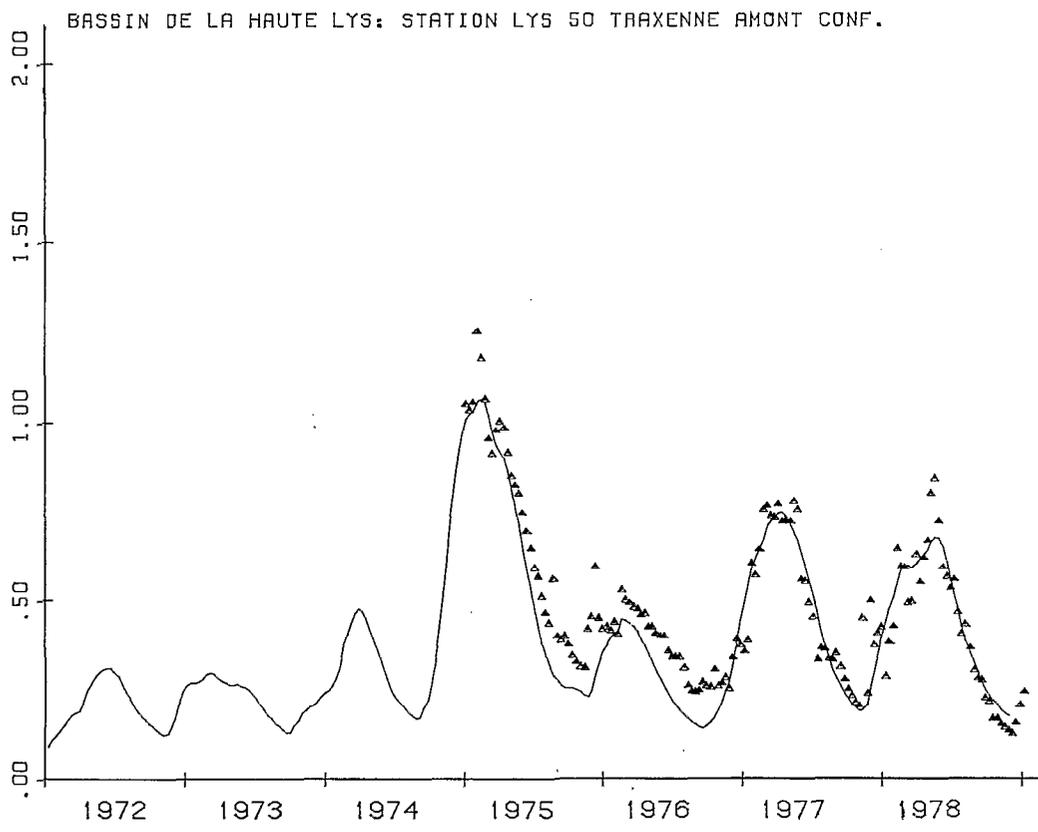


Fig. 33 e. — Reconstitution des séries hydrométriques

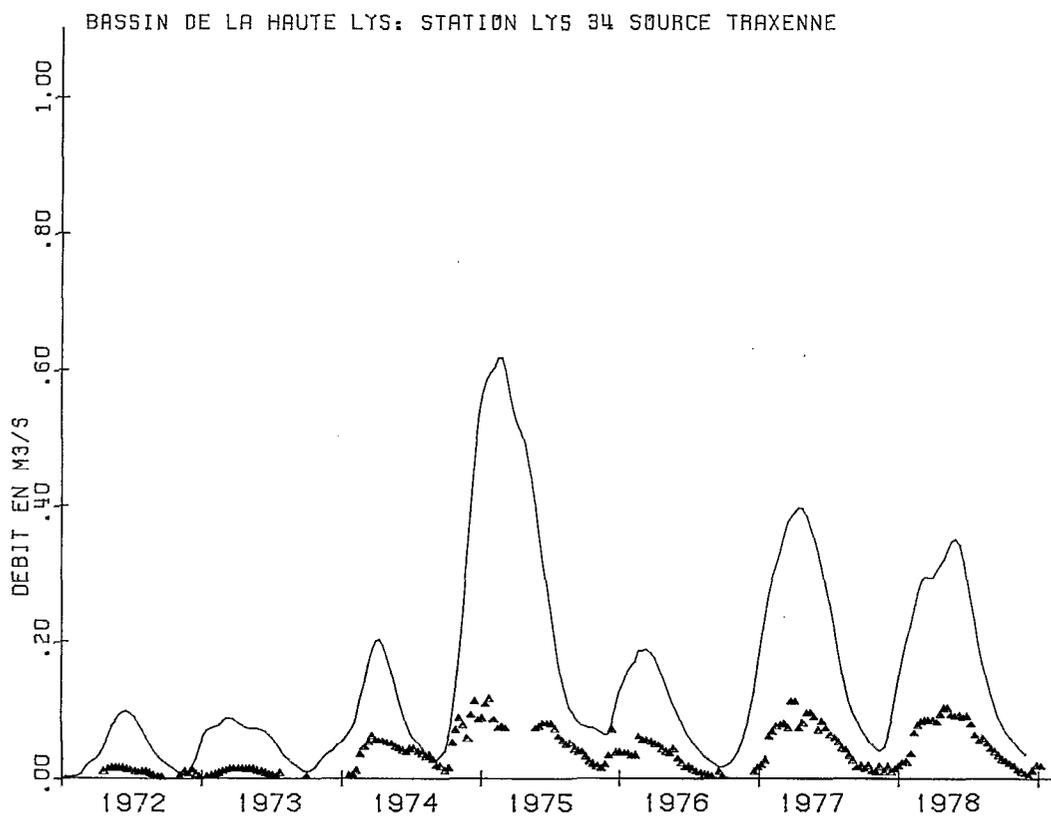


Fig. 33 f. — Reconstitution des séries hydrométriques

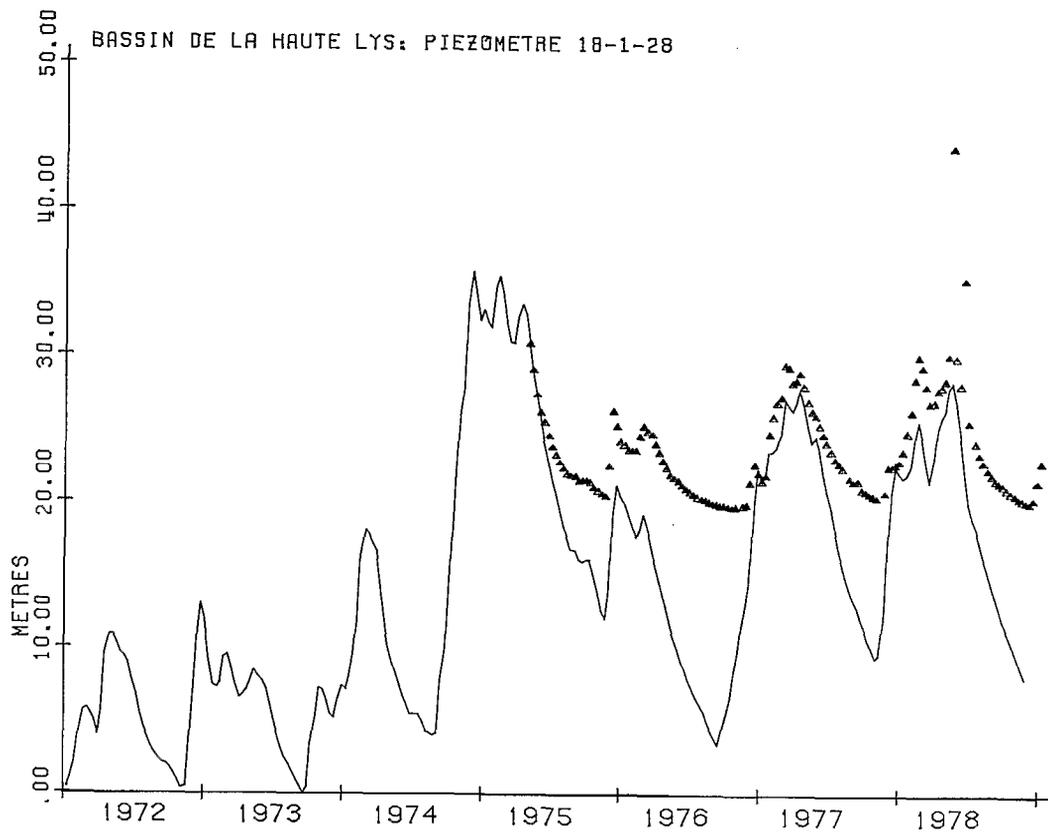
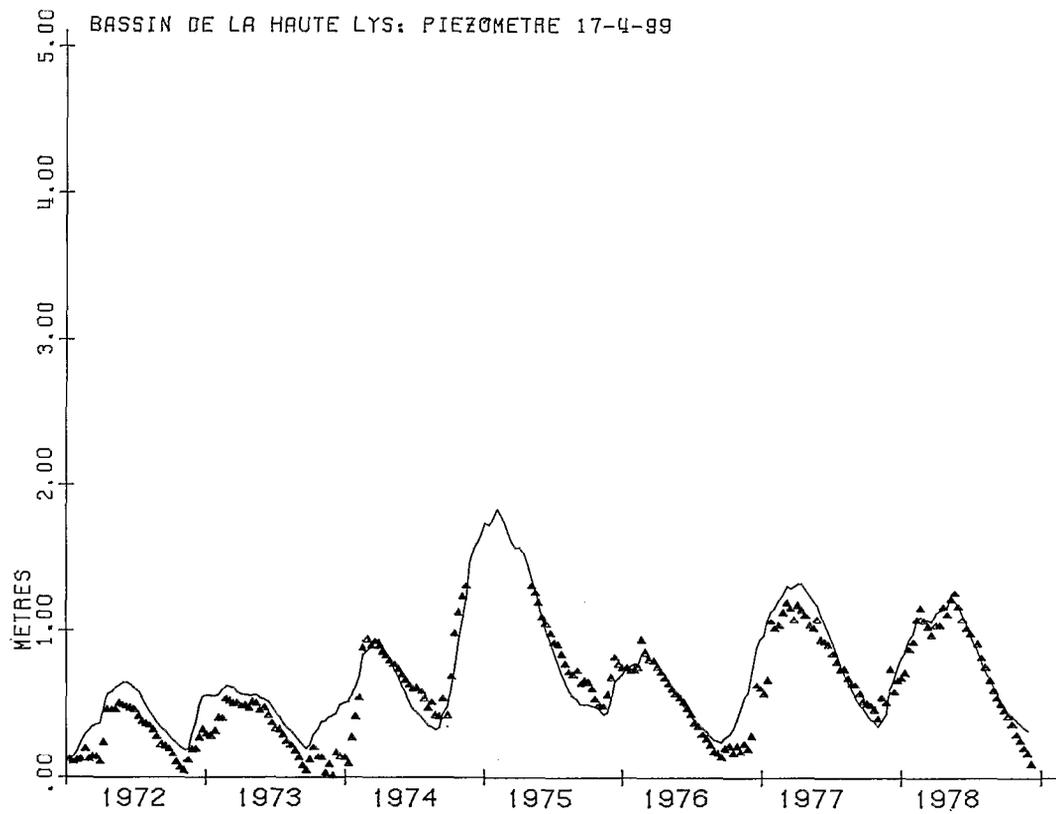


Fig. 34 a. — Reconstitution des séries piézométriques

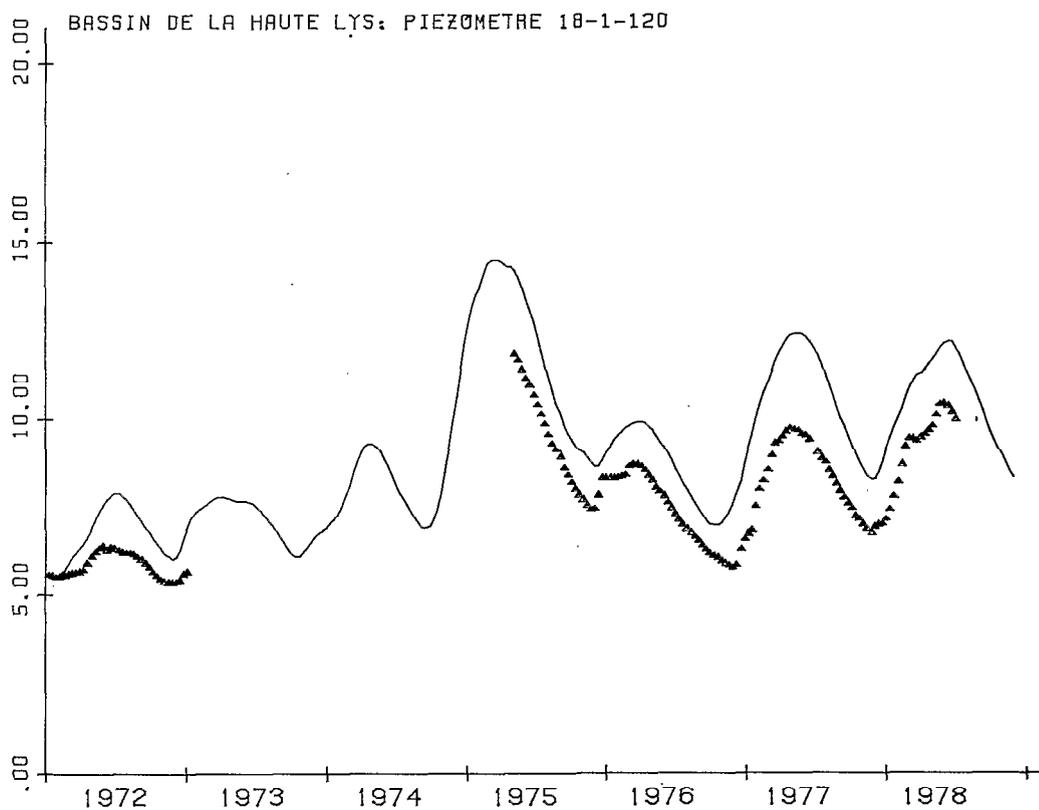
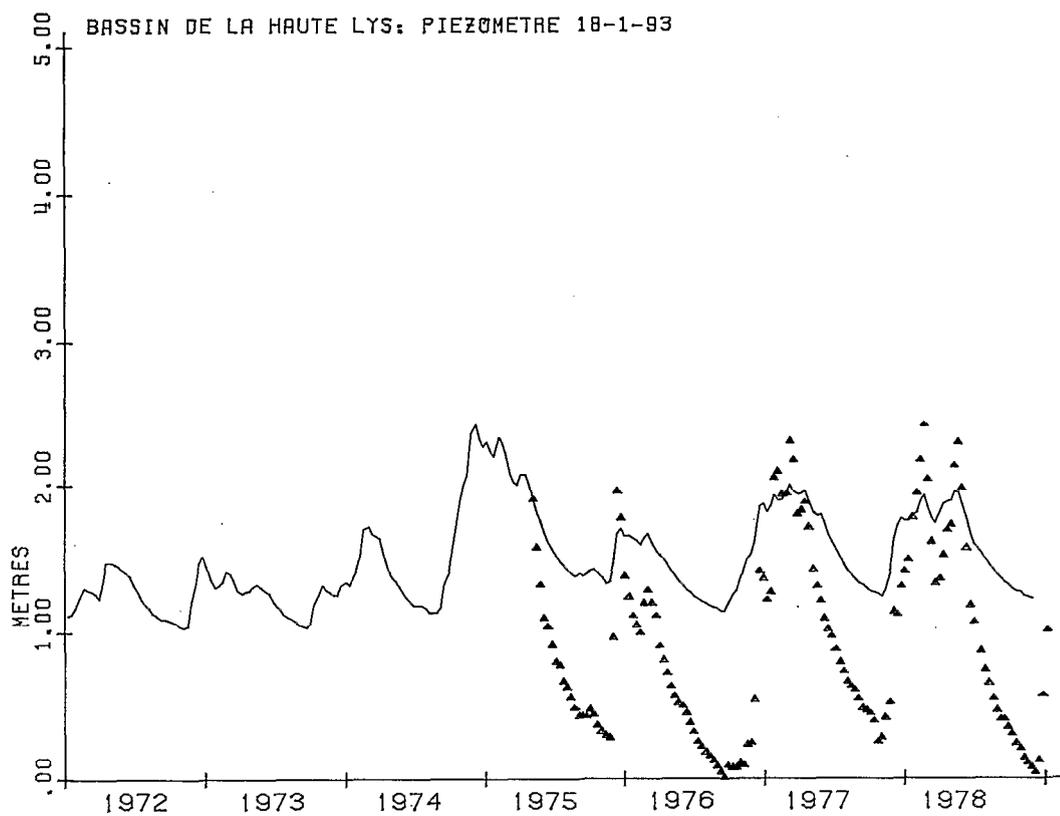


Fig. 34 b. — Reconstitution des séries piézométriques

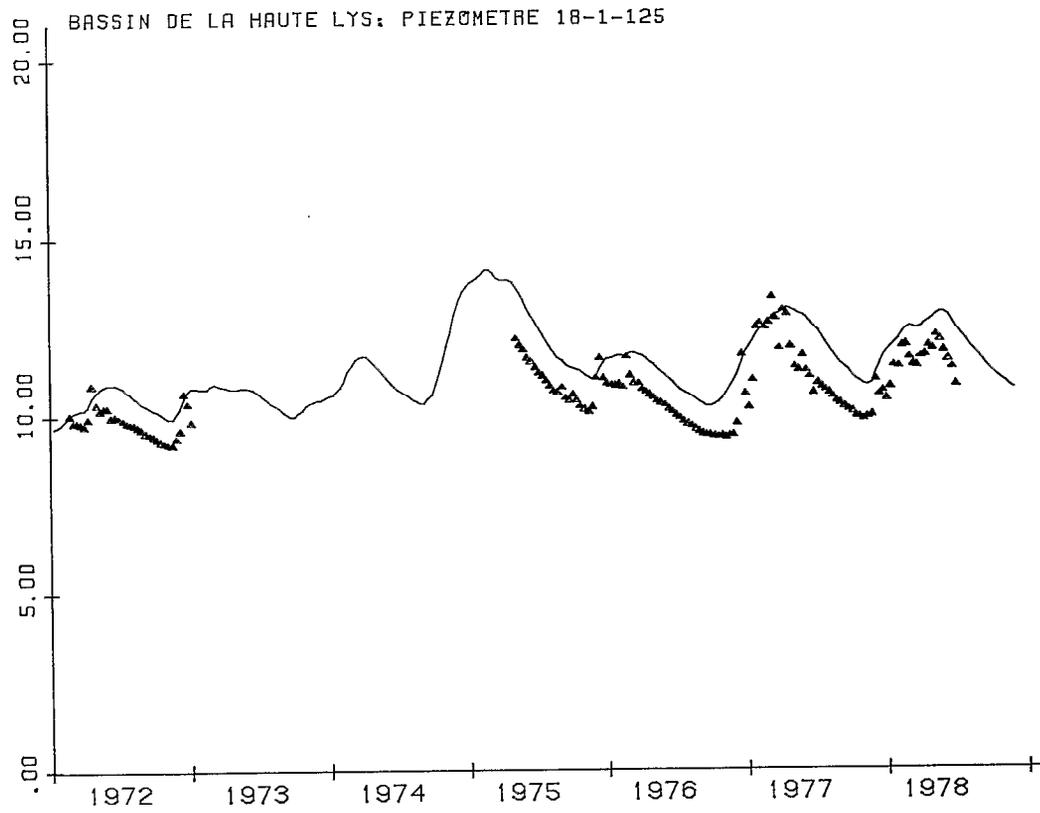
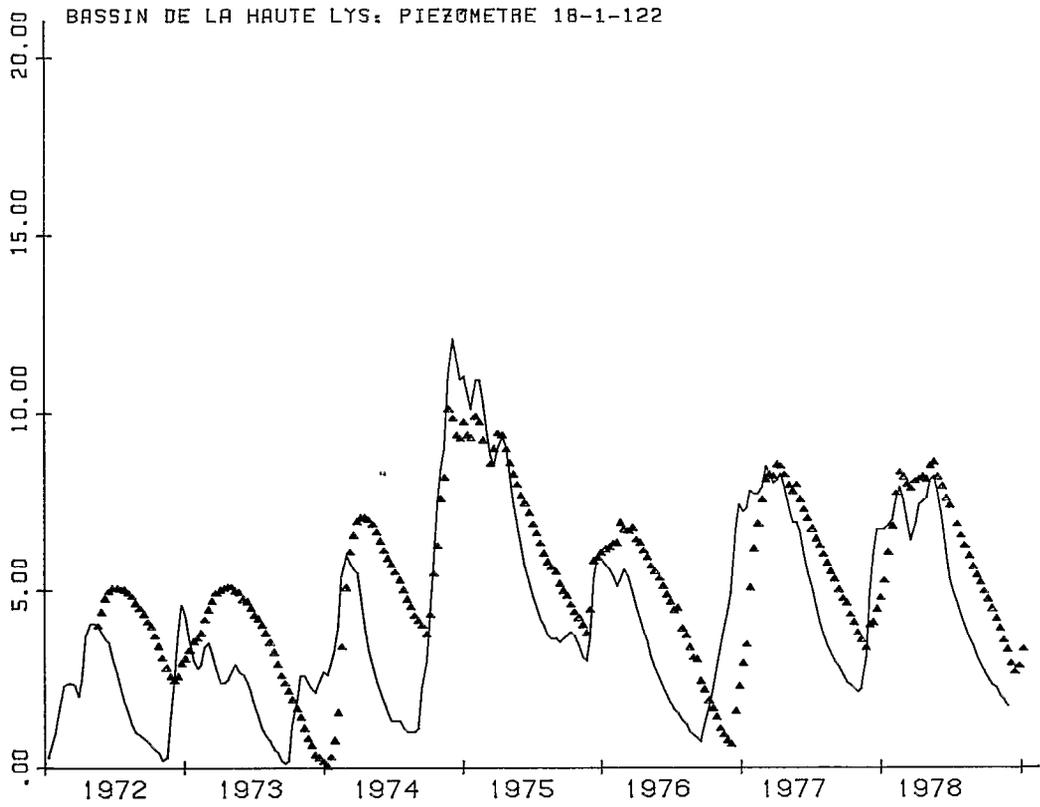


Fig. 34 c. — Reconstitution des séries piézométriques

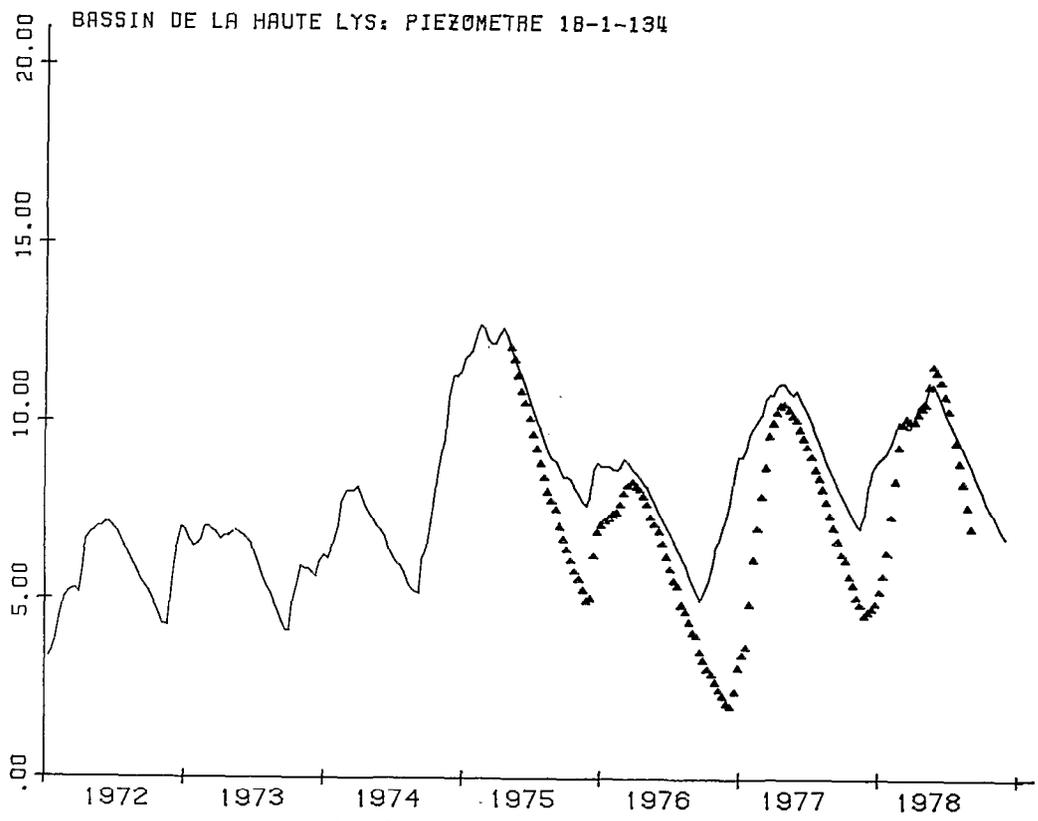
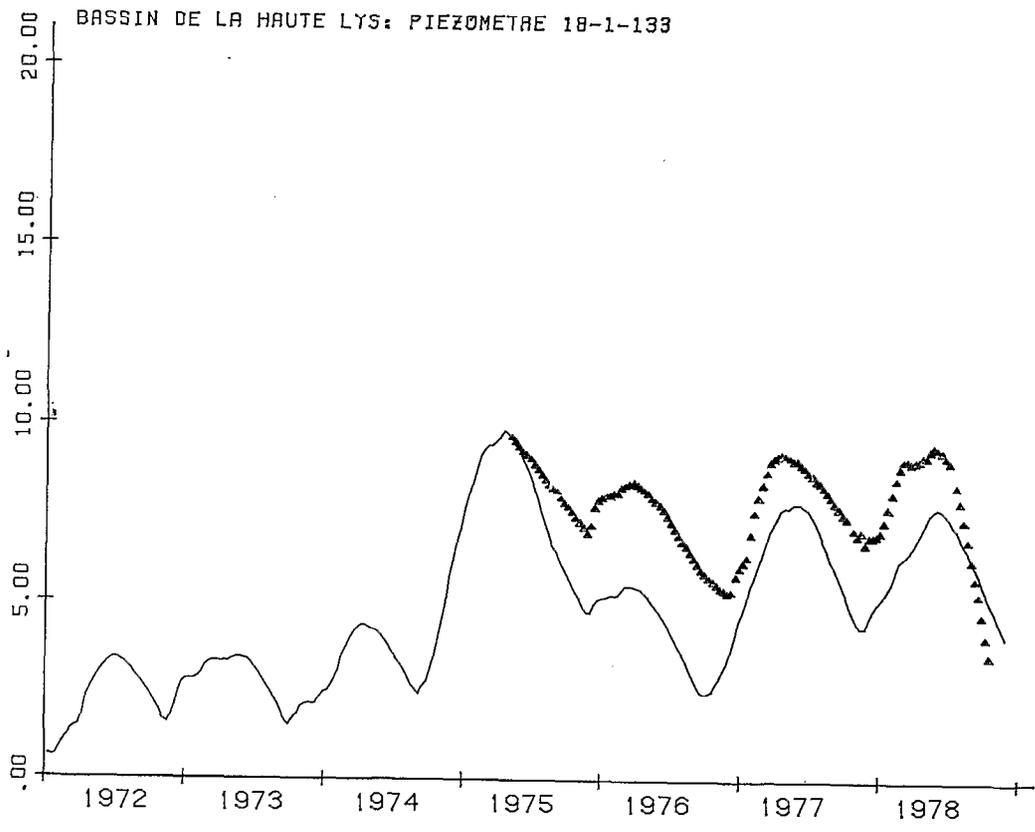


Fig. 34 d. — Reconstitution des séries piézométriques

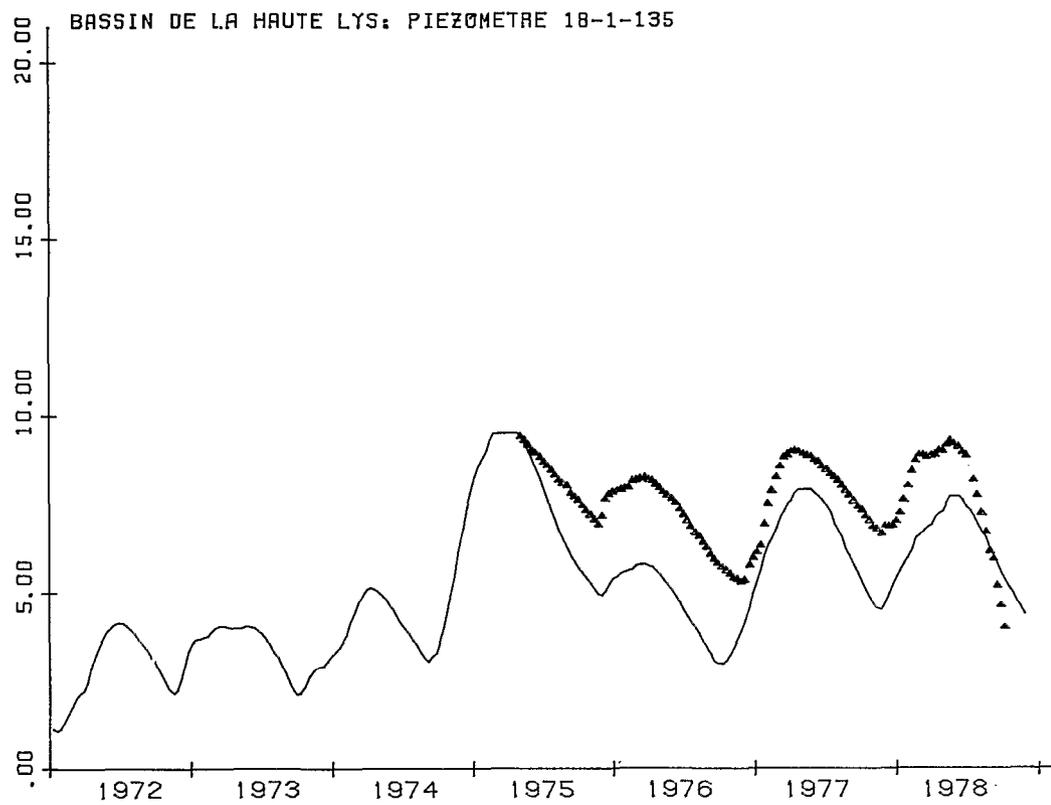
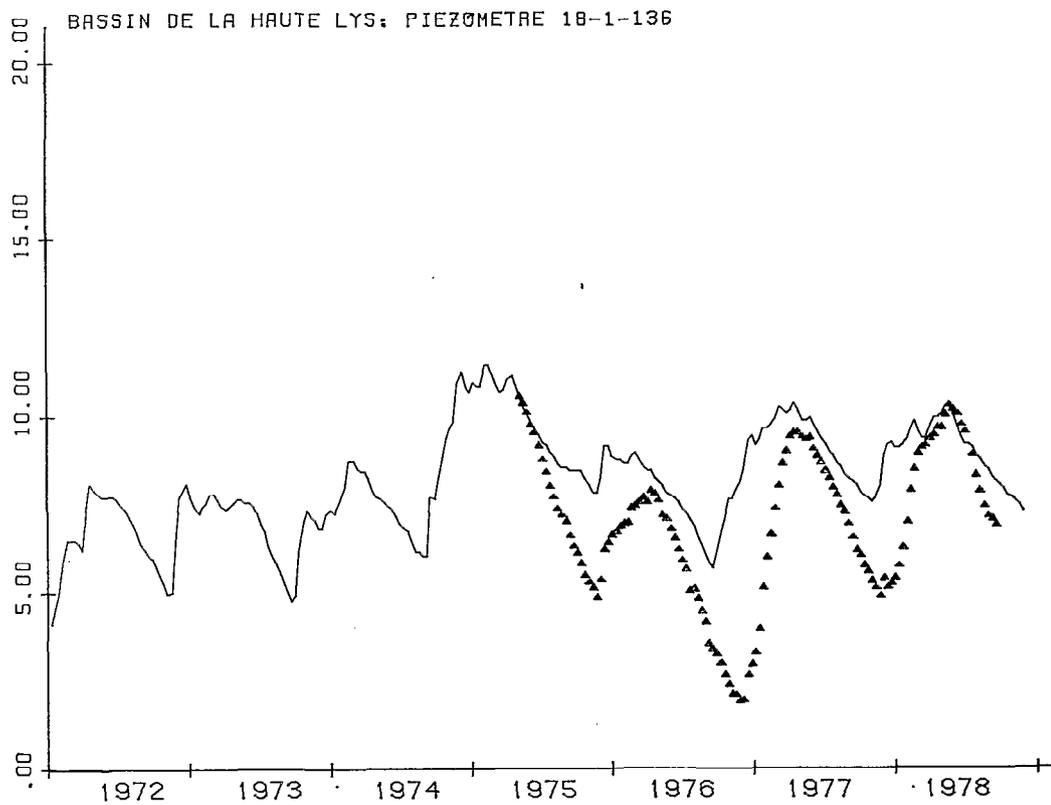


Fig. 34 e. — Reconstitution des séries piézométriques

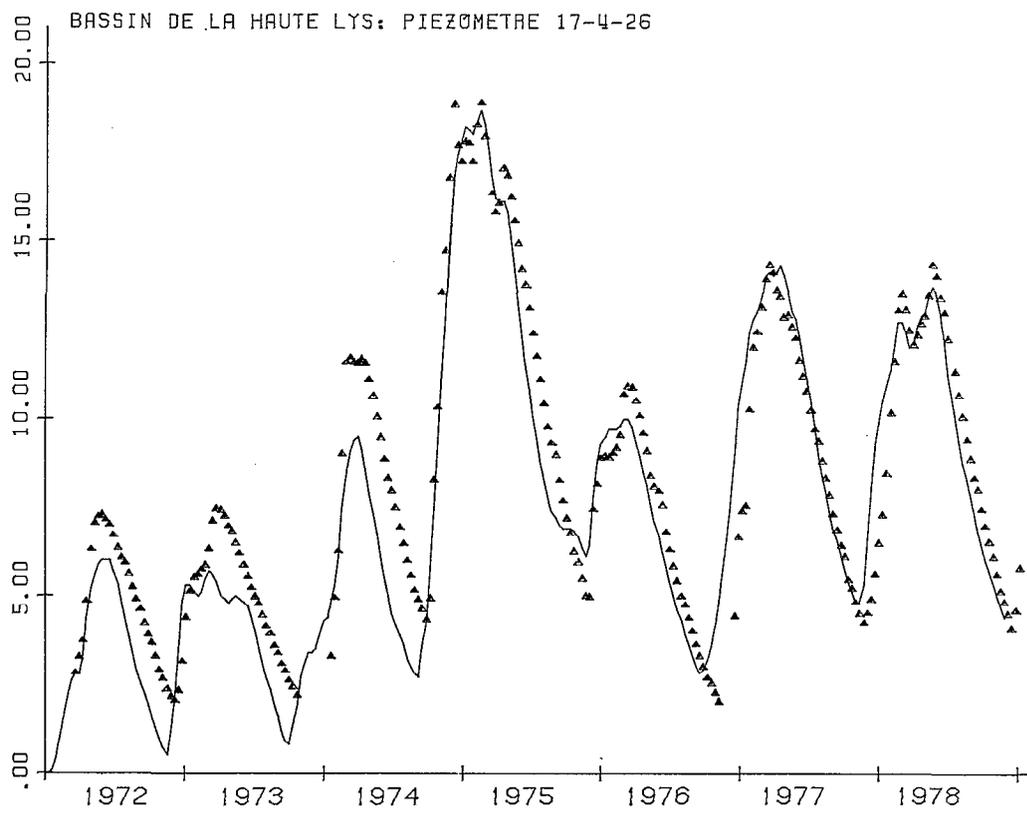
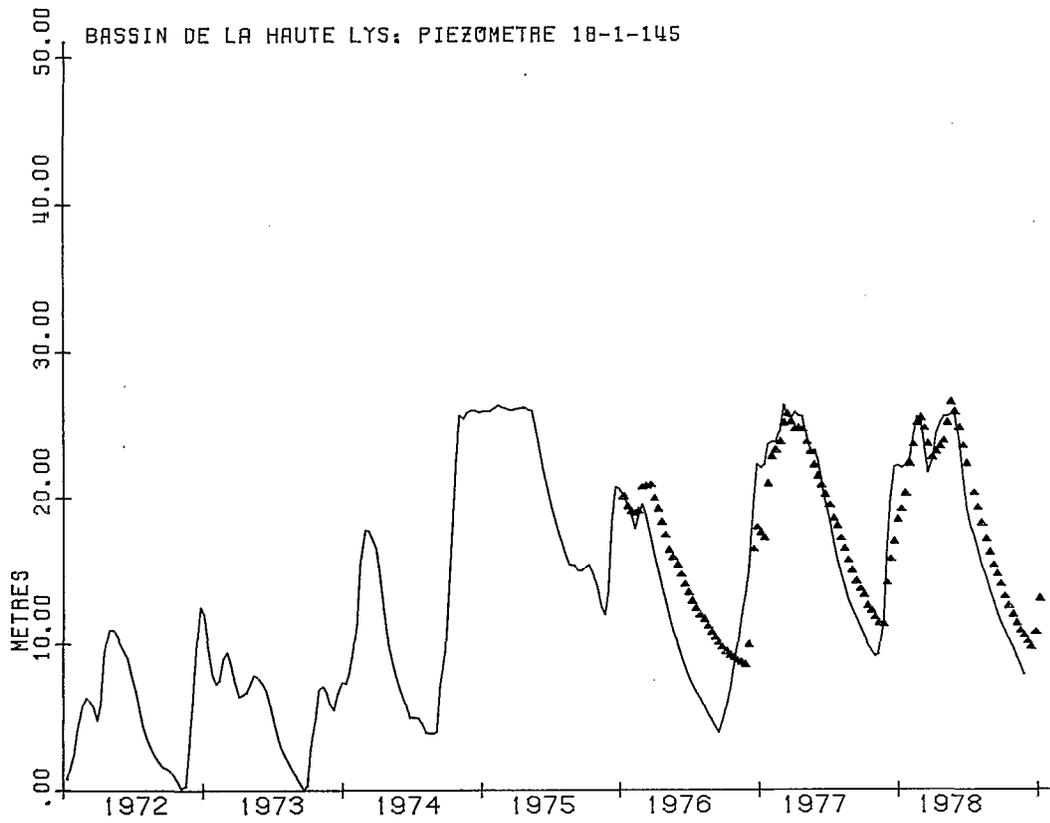


Fig. 34 f. — Reconstitution des séries piézométriques

### 3.2. LE BASSIN DU CARAMY

L'étude dont il va être question concerne une région d'environ 250 km<sup>2</sup>, entièrement située dans le département du Var, et englobant la majeure partie du bassin versant du Caramy.

Ce bassin draine des reliefs relativement importants et bien arrosés, ce qui lui vaut de présenter des crues intenses et parfois catastrophiques. Il est de plus en relation avec des massifs calcaréo-dolomitiques, étendus constituant des réserves d'eau souterraine considérables, ce qui lui assure en temps normal un honorable débit de base.

Cette répartition équilibrée entre eau souterraine et eau de surface en fait un exemple intéressant d'application du modèle couplé.

L'ensemble de ces caractères a priori favorables du point de vue de la ressource en eau, a justifié la construction à l'aval du bassin du barrage-réservoir de Carcès, dont la retenue collectant à la fois les eaux du Caramy et de l'Issole, fournit une part importante de l'alimentation en eau de la ville de Toulon.

Si l'on ajoute à cela le fait que la région est un secteur d'intense activité minière que l'on sait gênée, au moins localement, par des problèmes d'exhaure, on comprend l'intérêt pratique des études hydrologiques entreprises et les motivations de la Direction Départementale de l'Agriculture du Var grâce à laquelle le présent travail a pu être réalisé.

Ne seront pas décrites dans le cadre de cet article les différentes contributions de personnes ou d'organismes qui ont permis la réalisation de la synthèse sur modèle mathématique. Il sera seulement tenté de montrer comment une structure a priori complexe peut être schématisée. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter à la référence 4.

La région étudiée correspond aux lignes de relief dominant au Nord et au Sud la dépression est-ouest servant de voie de communication entre la ville de St Maximin et celle du Luc. La rivière Caramy emprunte ce passage sur une distance de près de 30 km.

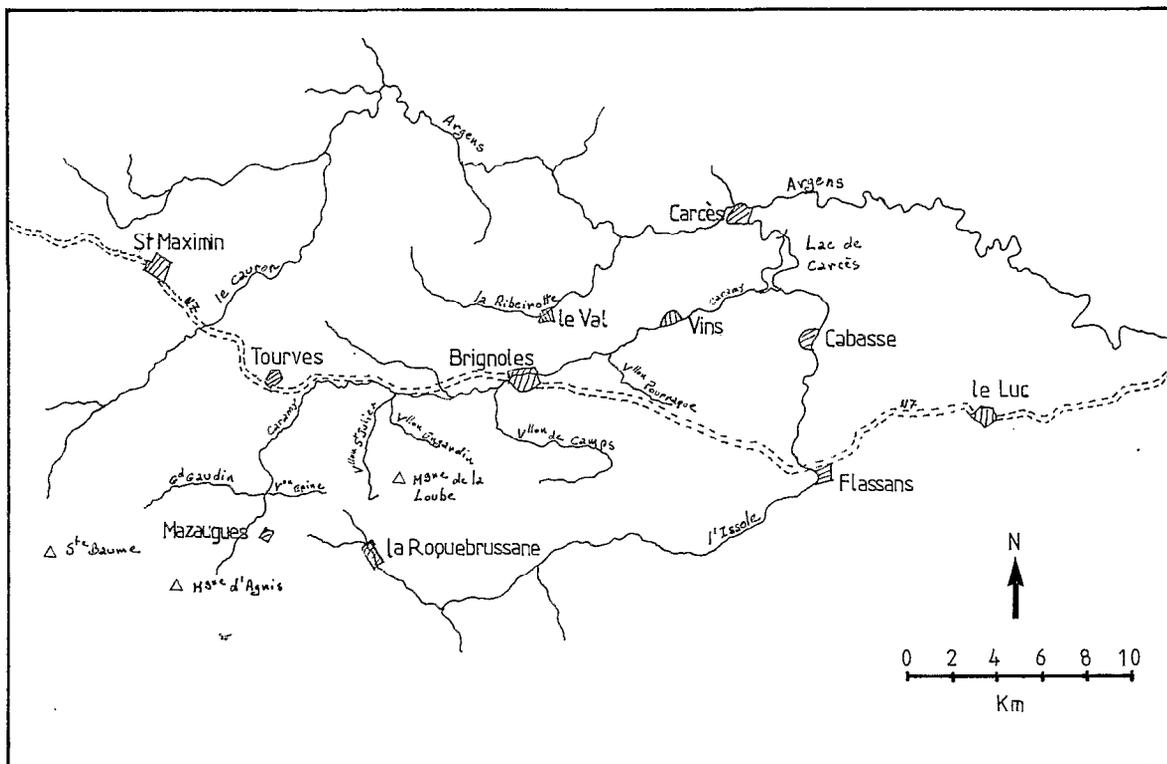


Fig. 35. — Plan de situation

Constituée en grande partie de massifs calcaires épais, la région présente une orographie marquée. Les montagnes de l'Agnis et de la Loube culminent au sud-ouest vers 800 m, non loin de la Sainte Baume, tandis que le réservoir de Carcès au nord-est établit le niveau de base aux alentours de 170 m d'altitude.

Les reliefs calcaires sont couverts d'une végétation forestière du type méditerranéen, parfois même luxuriante, probablement à la faveur de conditions particulières d'humidité du sol.

La culture de la vigne est largement développée sur les zones alluviales et les fonds de cuvette crétacée.

La rivière Caramy et quelques affluents mineurs drainent l'essentiel de notre région d'étude. Comme nous le verrons, le domaine souterrain débordant le bassin du Caramy, nous serons amenés à considérer également, dans notre modélisation, une partie du bassin de la Ribeirotte au nord, de l'Issole au sud et à l'est, et du Cauron au nord-ouest.

Le Caramy prend sa source au pied du massif d'Agnis, puis suit un trajet sud-nord en traversant le massif calcaréo-dolomitique de Mazaugues. Son cours s'infléchit en direction de l'est à la hauteur de Tourves pour emprunter le centre de la dépression alluviale jusqu'à Brignoles. La rivière remonte ensuite légèrement vers le nord jusqu'au Lac de Carcès en franchissant le massif de Vins dans lequel elle pénètre à la faveur d'accidents tectoniques majeurs. Le Caramy collecte principalement les eaux en provenance des reliefs s'étendant au sud de la région considérée, ainsi que celles de la plaine alluviale. La surface du bassin-versant, comptée à l'entrée du Lac de Carcès, est de 204 km<sup>2</sup>. L'écoulement est pérenne avec un débit d'étiage moyen à l'aval se situant entre 0,5 et 1 m<sup>3</sup>/s. Les crues importantes sont généralement observées à la fin de l'automne et en hiver et, dans une moindre mesure, au début du printemps.

On note sur la période 1972-1979 deux crues exceptionnelles dépassant 100 m<sup>3</sup>/s en valeur journalière, ayant d'ailleurs donné lieu à une inondation de la basse ville de Brignoles, quatre crues de plus de 50 m<sup>3</sup>/s. La crue annuelle se maintient au-dessus de 10 m<sup>3</sup>/s.

### 3.2.1. Description de la structure

L'ensemble de la zone étudiée est affecté par le bombement anticlinal E-W de Brignoles s'appuyant à l'ouest sur la dépression triasique de St Maximim et à l'est sur celle de Flassans. Tandis que le cœur de cet anticlinal est érodé, créant ainsi la vallée principale du Caramy, ses flancs se trouvent chevauchés au nord et au sud par d'épaisses séries secondaires carbonatées engendrant les reliefs majeurs de la région. La Fig. 36 montre une coupe schématique N-S de la zone d'étude à la hauteur de Brignoles.

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

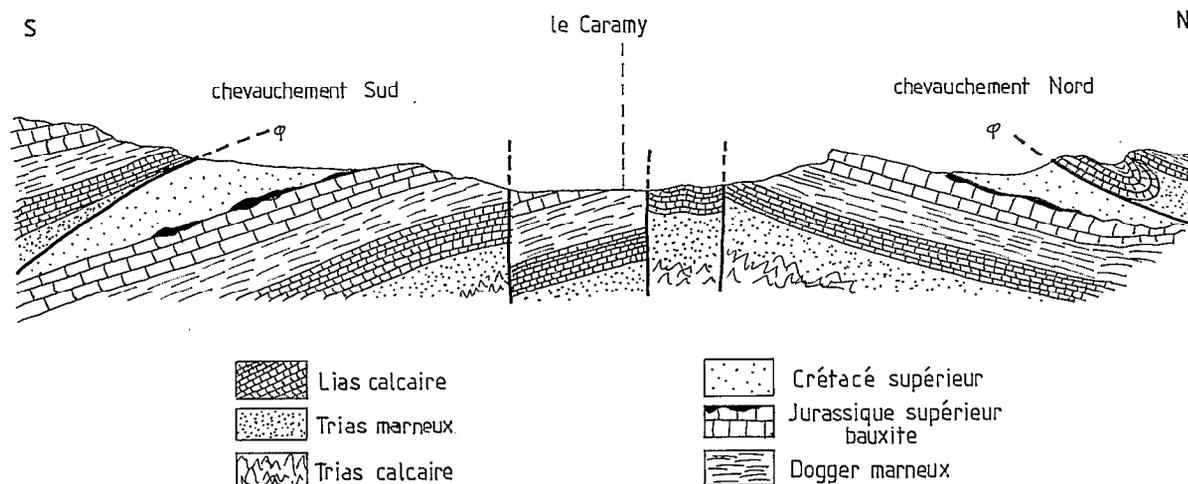


Fig. 36. — Coupe schématique à travers l'anticlinal de Brignoles

L'étude structurale de la région révèle un compartimentage délimitant des unités bien individualisées. Ce compartimentage résulte de la conjugaison de l'activité tectonique de direction E-W représentée par les plissements et les chevauchements, et de la tectonique cassante de direction N-S.

L'organisation du domaine en six unités hydrogéologiques relativement indépendantes résulte des considérations précédentes, les limites tectoniques impliquant la plupart du temps des conditions aux limites hydrauliques pour les aquifères. La démarche suivie pour cette schématisation est décrite par la Fig. 37.

Les bassins suivants seront distingués :

- **Bassin de Mazaugues** : ce bassin rassemble les eaux du massif de Mazaugues et du massif d'Agnis sous la forme de deux nappes, l'une inférieure dans le Jurassique supérieur autochtone, l'autre supérieure dans le Lias inférieur chevauchant. Ces deux nappes seront supposées complètement isolées entre elles par le Crétacé argileux. L'exutoire naturel majeur est le lit du Caramy ainsi que quelques sources recensées au nord près du contact avec la plaine alluviale, telle la Source de St Julien.
- **Bassin de l'Engardin** : ce bassin récolte les eaux souterraines de la dolomie jurassique du massif de l'Engardin d'une part, et des formations chevauchantes du massif de la Loube d'autre part. Là encore, nous synthétiserons l'ensemble en deux nappes séparées par le Crétacé, drainées jusqu'au Caramy par le Vallon d'Engardin et au nord par la plaine alluviale.
- **Bassin de St Quinis-Merlançon** : en l'absence d'unités chevauchantes sur notre zone d'étude, nous admettons sur ce bassin l'existence d'une nappe libre unique dans la dolomie du Jurassique supérieur drainée en son centre par le Vallon de Camps et en sa bordure nord par la vallée du Caramy.
- **Bassin du Val** : ce bassin recèle un aquifère dolomitique qui devient captif au nord sous le Crétacé imperméable. Il est situé presque en totalité hors du bassin du Caramy et drainé directement à l'Argens par la Ribeirotte. Nous ne le considérons, dans notre étude, que par souci d'homogénéité comme appartenant au flanc nord de l'anticlinal de Brignoles.
- **Bassin de Vins-St Christophe** : ce bassin regroupe les massifs de Vins-St Christophe et du chevauchement de Vins ; il sera supposé renfermer également deux nappes, l'une dans la dolomie jurassique et les calcaires bathoniens, l'autre dans le complexe chevauchant. Des études ont montré l'existence de communication entre ces deux nappes à travers le chevauchement, à la faveur de contacts entre dolomie jurassique et dolomie hettangienne. Le drainage s'effectue par le Caramy, et à l'est par l'Issole pour la nappe inférieure, directement au lac de Carcès pour la nappe supérieure.
- **La plaine alluviale du Caramy** : cette plaine s'étend, dans notre domaine d'étude, entre St Maximin et Brignoles. Bien qu'elle soit avec certitude géologiquement très hétérogène, nous considérerons qu'elle contient une nappe unique drainée par le Caramy et, à l'ouest, par le Cauron, affluent de l'Argens, et recevant l'eau au sud des bassins de Mazaugues, Engardin et St Quinis-Merlançon, la communication avec le bassin du Val étant barrée par les affleurements du Dogger marneux. Cette nappe alluviale débouche en aval sur le bassin de Vins-St Christophe avec lequel elle ne doit présenter que des communications hydrauliques réduites par la présence du décrochement de St Christophe.

### 3.2.2. Relations entre domaine de surface et domaine souterrain

#### 3.2.2.1. Extension relative des domaines

Comme on peut le constater, bien qu'il soit découpé en bassins hydrogéologiques, le domaine souterrain qui vient d'être décrit forme un système unique en relation avec le Caramy d'une part, mais aussi avec d'autres rivières étrangères à son bassin telles que l'Issole, la Ribeirotte et le Cauron. Il en résulte que l'extension du domaine souterrain pris en compte est supérieure à celle du bassin de surface du seul Caramy.

#### 3.2.2.2. Zones d'infiltration, zones de ruissellement

La distinction entre formations géologiques aquifères et imperméables conduit à séparer le domaine de surface en une zone d'infiltration et une zone de ruissellement pur. La répartition de ces zones sera établie d'après la carte géologique interprétée. D'une façon générale, nous considérerons comme impropres à l'infiltration les formations argilo-gréseuses du Crétacé, ainsi que les marno-calcaires du Trias et du Dogger inférieur. Ceci ne veut pas dire que nous écarterons la possibilité d'une rétention de l'eau dans ces roches, mais seulement qu'elles ne donneront pas lieu à l'alimentation des nappes modélisées.

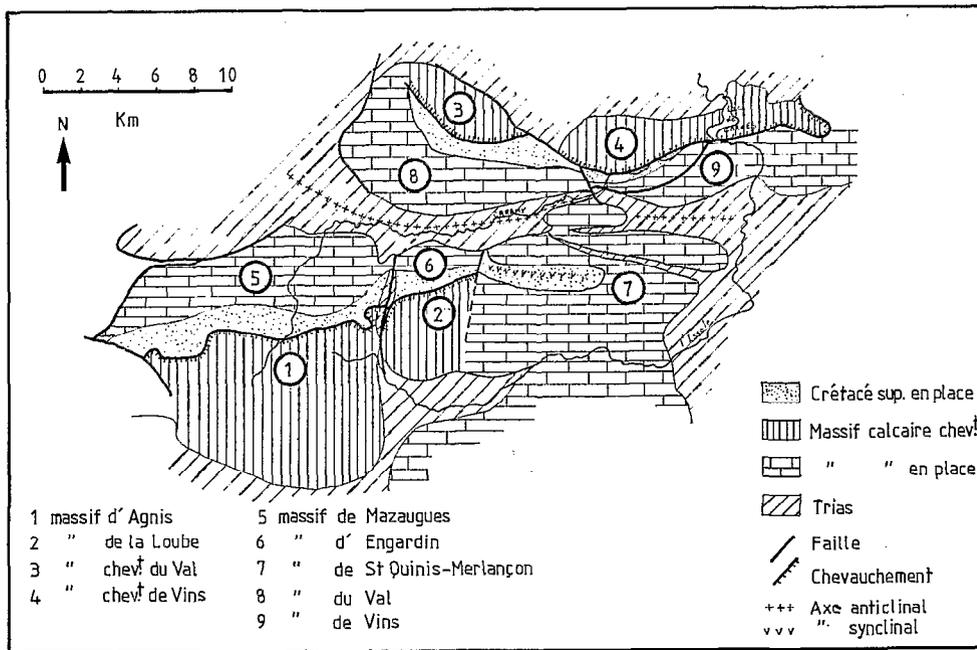


Fig. 37. — Carte structurale de la zone d'étude

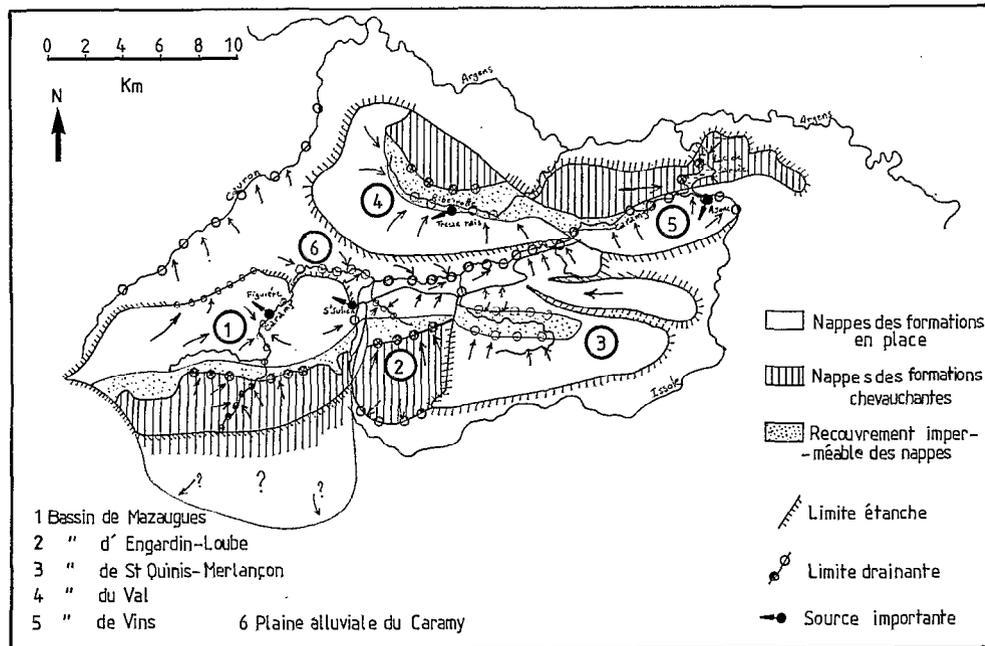


Fig. 38. — Schéma hydrogéologique



### 3.2.2.3. Relations nappes-rivières

Le Caramy et ses affluents qui constituent l'exutoire du domaine de surface réalise la liaison hydraulique entre les bassins hydrogéologiques. Cette liaison est soumise aux variations de la nature géologique du sous-sol ainsi qu'aux variations saisonnières de l'état piézométrique des nappes. Le modèle distinguera ainsi le cours de la rivière suivant qu'il s'effectue sur des terrains perméables ou imperméables.

### 3.2.3. Mise en œuvre du modèle

#### 3.2.3.1. Domaine de surface

Le domaine superficiel a été décrit par 615 mailles carrées de 1 250 m, 625 m et 312,5 m de côté.

Le bilan hydrique a été réalisé au pas de temps journalier à partir des données suivantes (cf. Fig. 39) :

- précipitations en quatre postes pluviométriques,
- évapotranspiration potentielle uniforme (Penman),
- cartographie des formations géologiques affleurantes.

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

- sols de plaine alluviale,
- sols calcaréo-dolomitiques 1 (autochtone),
- sols calcaréo-dolomitiques 2 (chevauchement),
- sols imperméables argilo-gréseux,
- sols imperméables marno-calcaires.

Il a été également tenu compte de rejets effectués en rivière par des exhaures de mines.

#### 3.2.3.2. Domaine souterrain

Les six bassins hydrogéologiques constituant la structure renferment neuf unités aquifères éventuellement connectées les unes aux autres, qui ont été discrétisées en mailles carrées de 1 250 m, 625 m et 312,5 m de côté (cf. Fig. 40).

Les paramètres hydrodynamiques des aquifères, mesurés en de très rares points, ont été estimés d'après le résultat d'études antérieures. Leur extension aux mailles du domaine souterrain sera effectuée à l'occasion du calage.

Les débits exhaures par les mines ont été introduits dans les aquifères concernés.

### 3.2.4. Calibrage du modèle

On disposait pour le calibrage du modèle :

— de séries hydrométriques journalières en deux stations, l'une à l'amont, l'autre à l'aval, sur la période 1972-1979 ;

— de mesures piézométriques en trois points, irrégulièrement réparties dans le temps. Cette information rare pouvait cependant être complétée par des estimations basées sur l'altitude des émergences des nappes.

Contrairement au cas de la Haute Lys, l'ajustement du modèle a dû porter essentiellement sur les débits observés.

Ce calibrage a concerné les points suivants :

#### 3.2.4.1. Synchronisme des crues

Il est réglé par le temps de concentration dont une valeur initiale est obtenue par l'examen synoptique des précipitations et des débits.

#### 3.2.4.2. Bilan hydrique

Ce calage concerne les deux paramètres du réservoir de bilan des fonctions production. On y parvient en assurant, pour chaque station hydrométrique, une quantité d'eau disponible annuellement en rapport avec les volumes mesurés.

### 3.2.4.3. Forme des crues du ruissellement

L'intensité du maximum et l'aspect du tarissement est réglé par les paramètres des réservoirs de transfert des fonctions production.

### 3.2.4.4. Débit de base et tarissement des nappes

L'importance du débit de base est liée directement au paramètre des fonctions production régissant le partage entre ruissellement et infiltration. L'allure du tarissement et des variations piézométriques dépend par contre des paramètres hydrodynamiques du domaine souterrain.

### 3.2.5. Résultat des simulations

Deux types de simulations ont été effectués ; les unes au pas de temps décadaire permettant un calage global pluriannuel, les autres au pas de temps journalier, et surtout destinées à la critique des données pluviométriques et à une meilleure compréhension des comportements du bassin versant.

#### 3.2.5.1. Simulation au pas de temps décadaire

La période de simulation va du 1<sup>er</sup> janvier 1968 au 31 décembre 1979, et a été découpée pour le calcul en 438 pas de temps de 10 jours. Ce pas de temps, tout en permettant un calage assez fin du modèle, présente l'avantage d'intégrer le résultat des calculs des fonctions production influencés par les anomalies des relevés pluviométriques.

*Les séries hydrométriques :* Les Fig. 41 et 42 montrent, sur la période de référence, la comparaison entre le débit calculé et le débit mesuré aux stations de Vins (aval bassin) et de Caramy-Chantiers (amont bassin) On constate que les crues ainsi que les étiages sont en moyenne correctement représentés. Rares sont les cas où les écarts décennaux absolus sont supérieurs à 30% pour la station de Vins.

Sur l'ensemble de la période où coexistent calculs et observations, les volumes écoulés se répartissent annuellement comme suit :

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

\* année incomplète

### VOLUMES ANNUELS ECOULES AU STATIONS DE VINS ET DE CARAMY-CHANTIERS EN MILLIONS DE M<sup>3</sup> COMPARAISON ENTRE LES CALCULS ET LES MESURES

On constate une bonne reproduction par le modèle du volume écoulé à Vins sur l'ensemble de la période des données disponibles. L'écart annuel absolu n'excède pas en général 10%, sauf pendant l'année 1972 où les observations sont d'ailleurs incomplètes.

- *Les séries piézométriques :* La Fig. 43 montre les résultats du calage au piézomètre de Vins 36.

#### 3.2.5.2. Simulation au pas de temps journalier

Conservant les paramètres réglés sur les simulations décennales, on a effectué un calcul au pas de temps journalier sur la période Janvier-Février-Mars 1978 (Fig. 44).

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

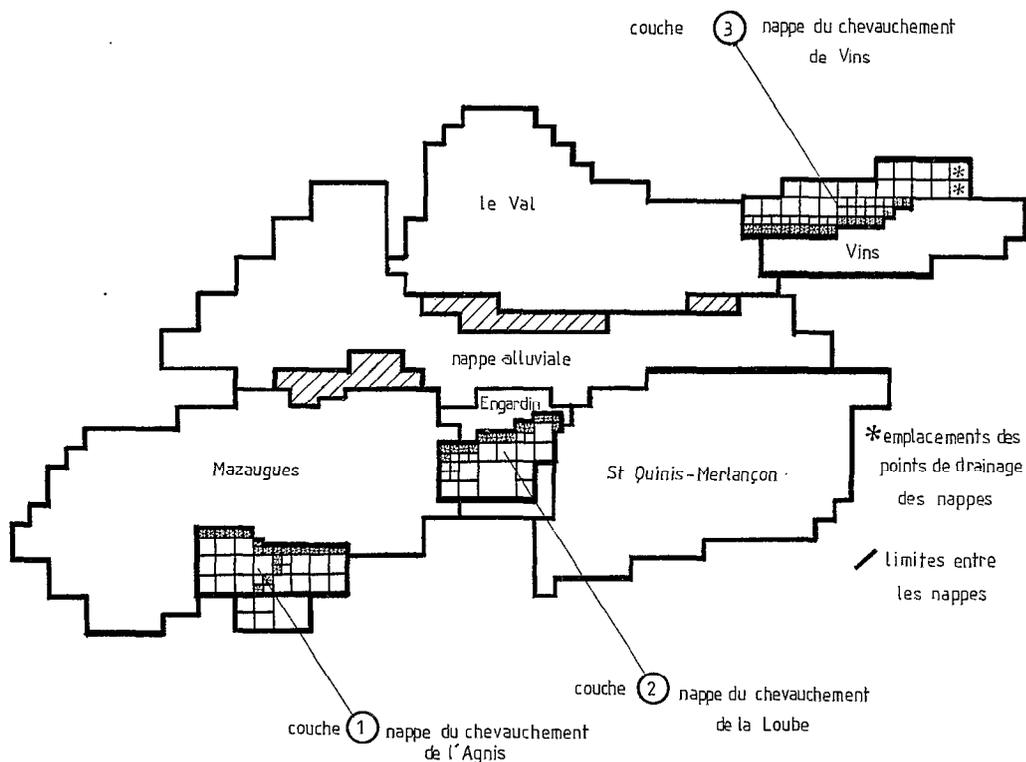


Fig. 40 a. — Maillage des nappes des formations chevauchantes — Couches 1 à 3

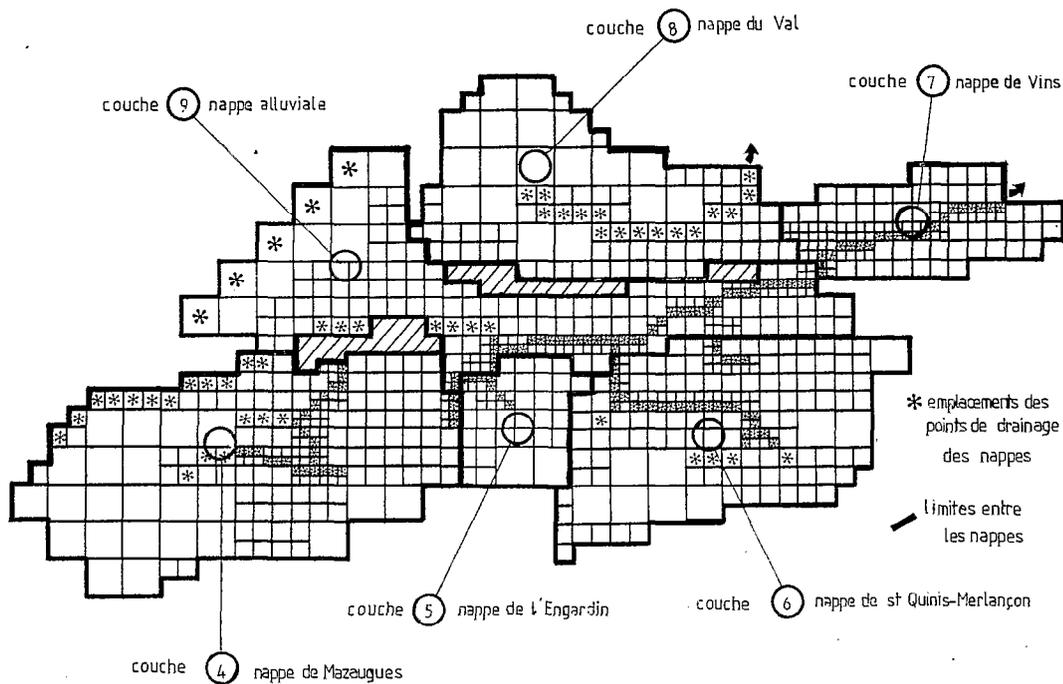


Fig. 40 b. — Maillage des nappes des formations en place — Couches 4 à 9

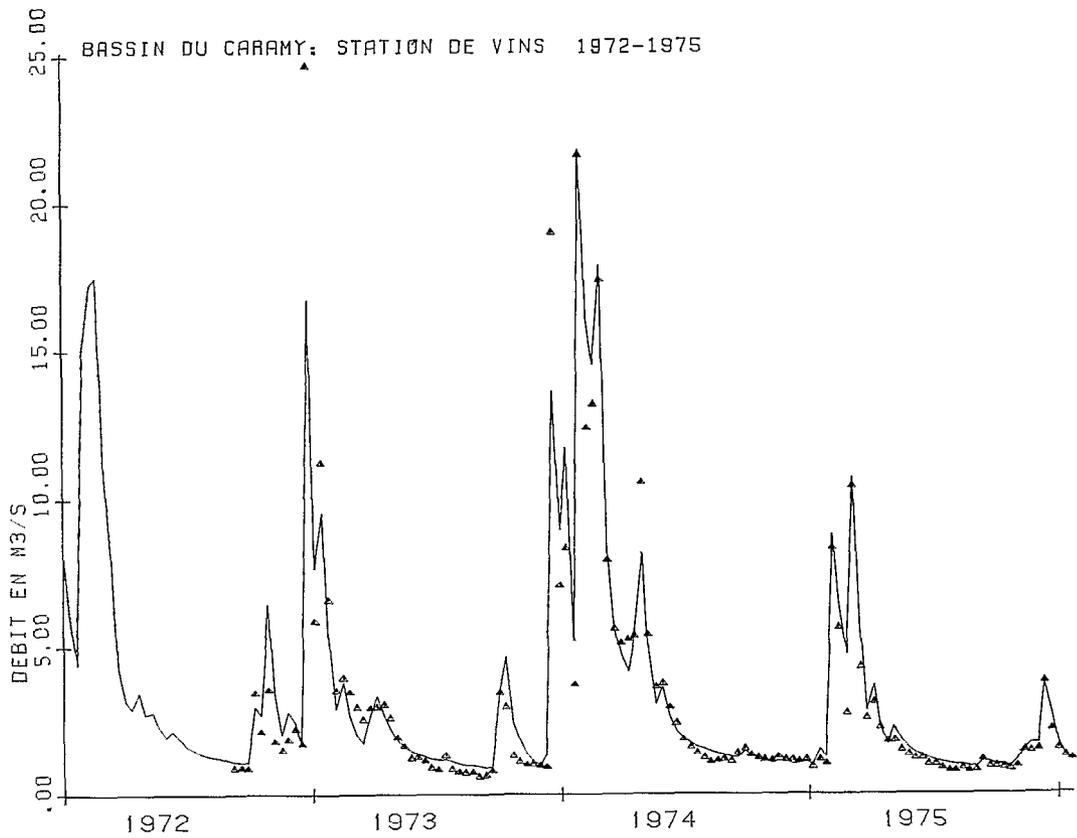


Fig. 41 a. — Reconstitution des débits décadaires à Vins, années 1972-1975

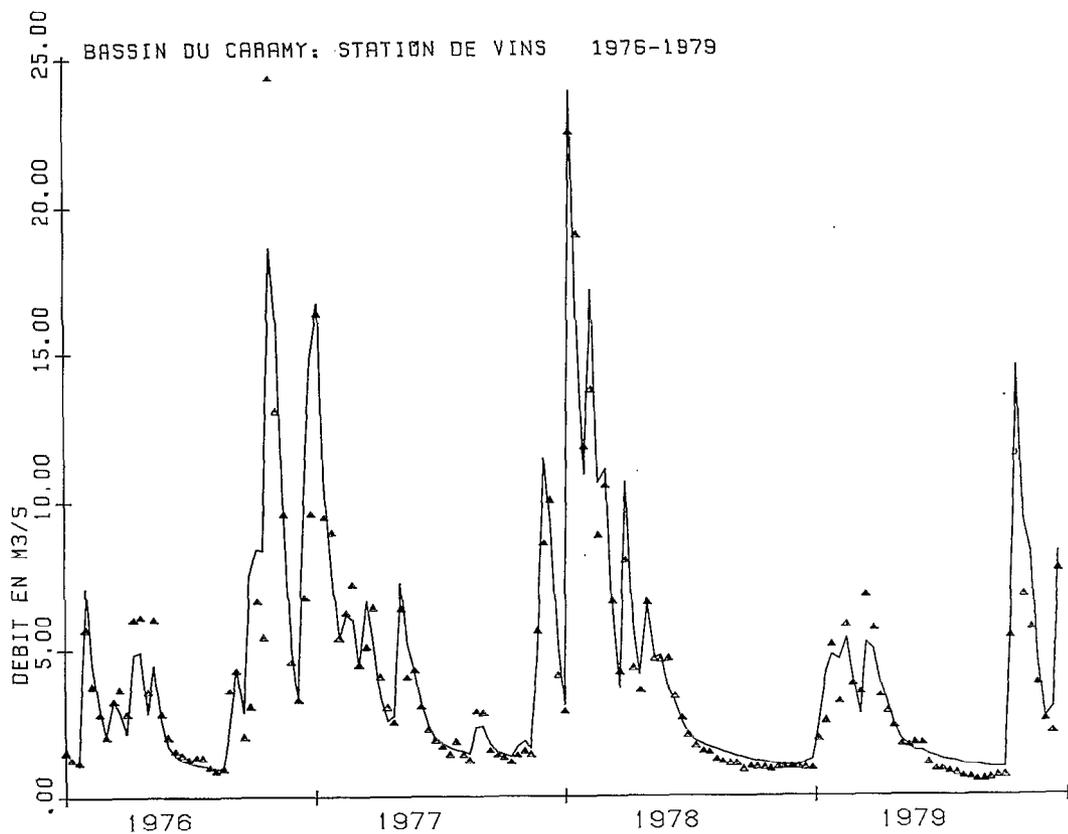


Fig. 41 b. — Reconstitution des débits décadaires à Vins, années 1976-1979

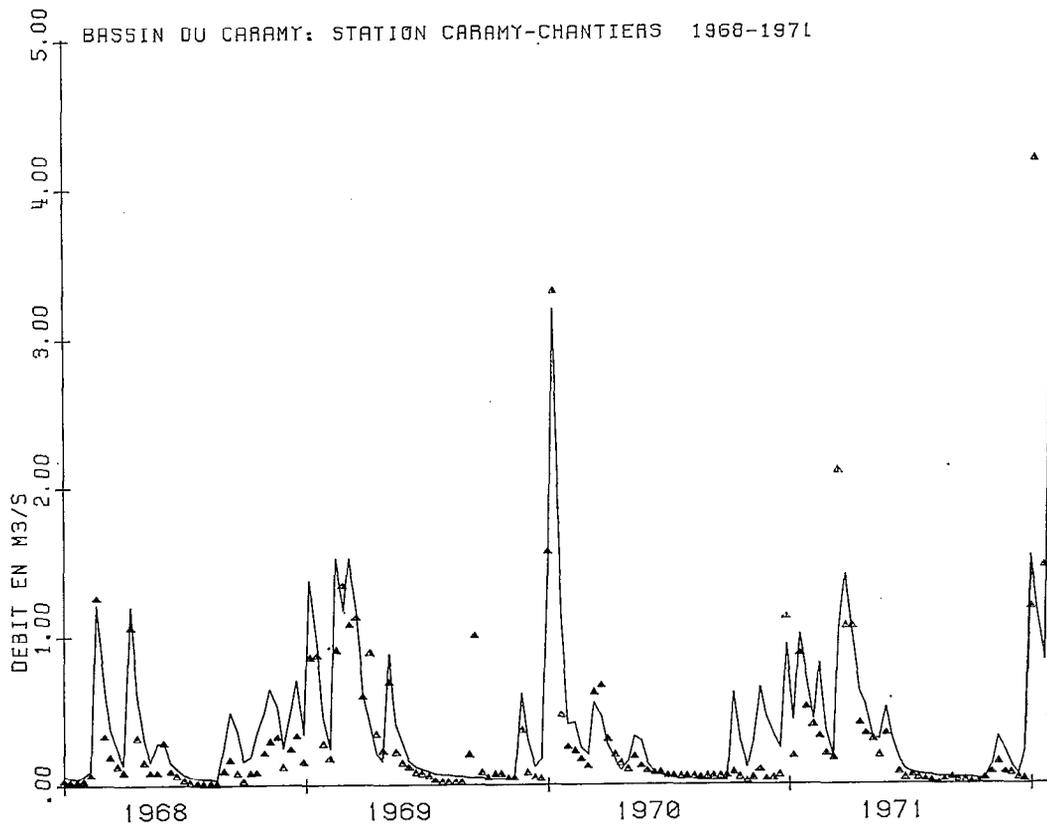


Fig. 42 a. — Reconstitution des débits décadaires à Caramy-chantiers, années 1968-1971

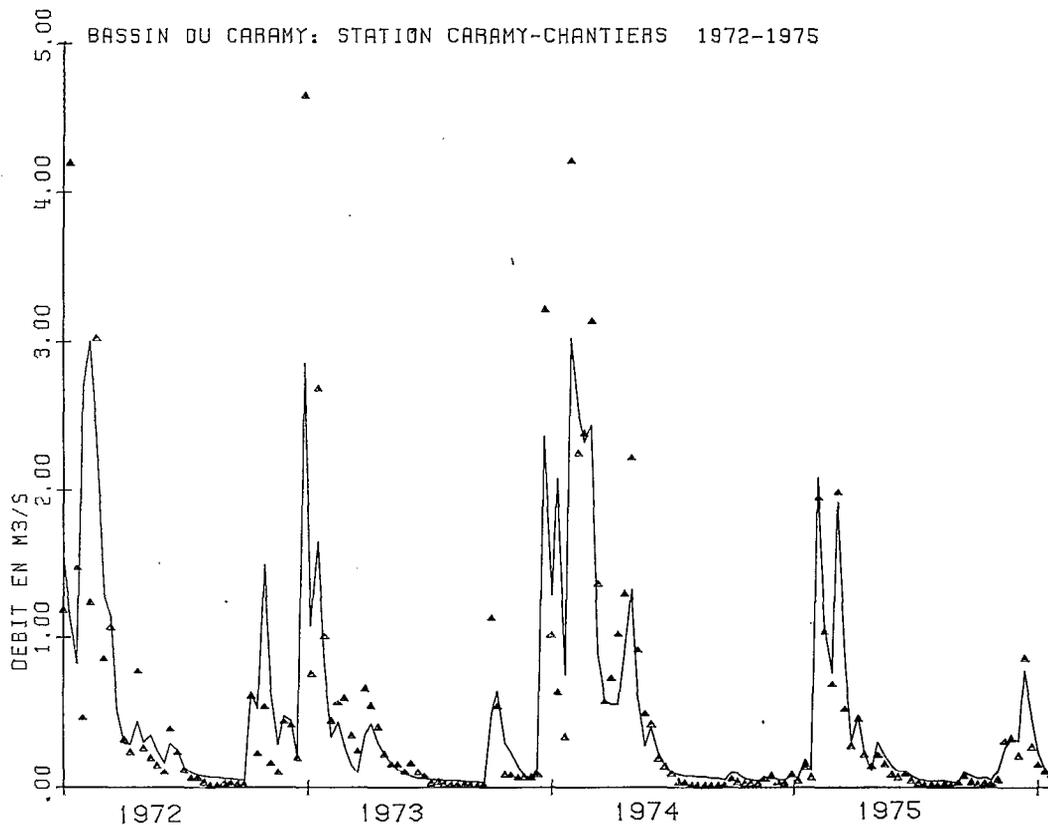


Fig. 42 b. — Reconstitution des débits décadaires à Caramy-chantiers, années 1972-1975

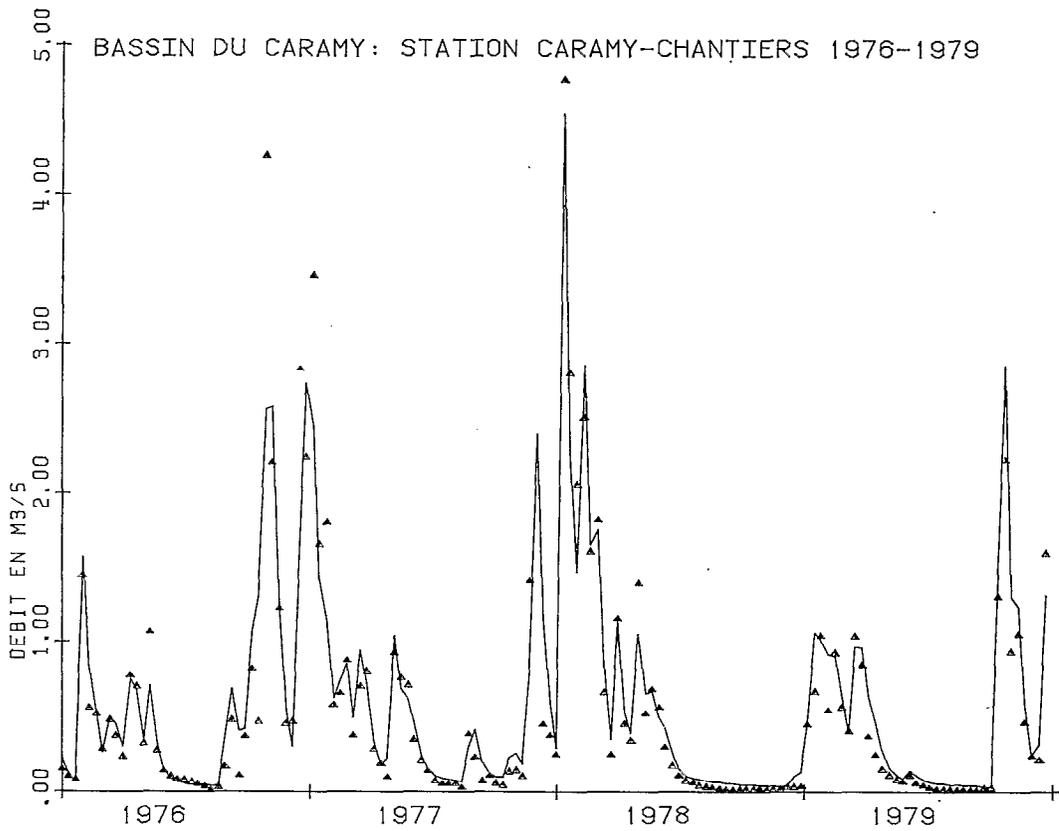


Fig. 42 c. — Reconstitution des débits décadaires à Caramy-chantiers, années 1976-1979

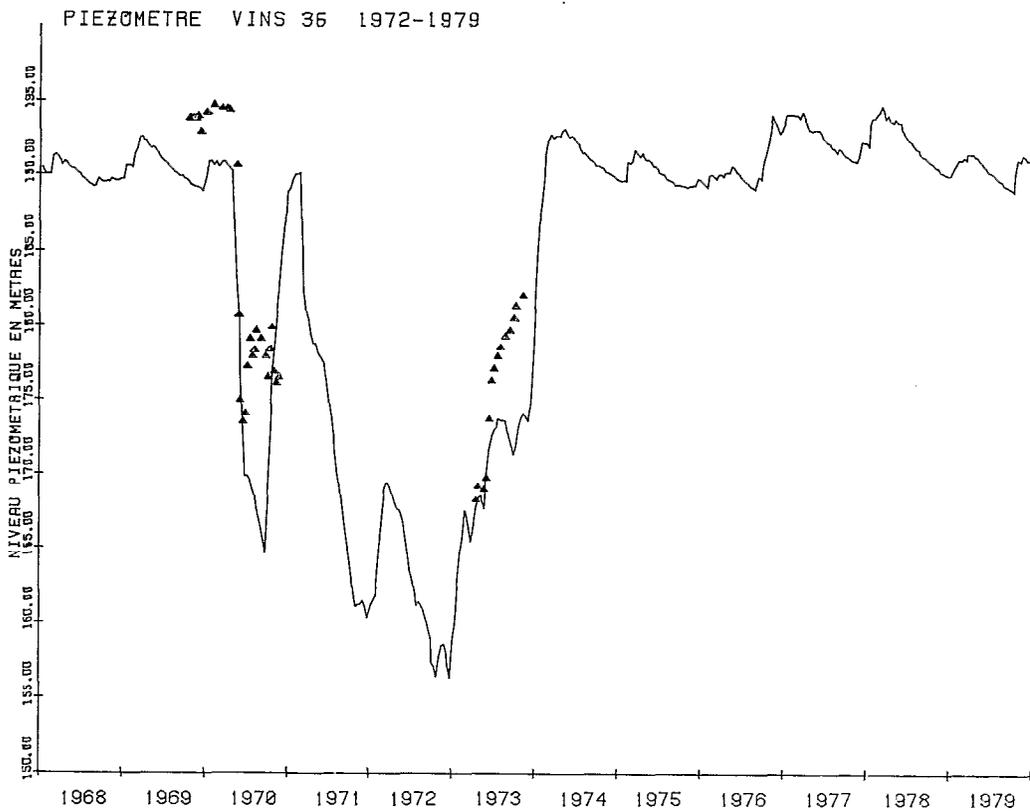


Fig. 43. — Reconstitution des séries piézométriques

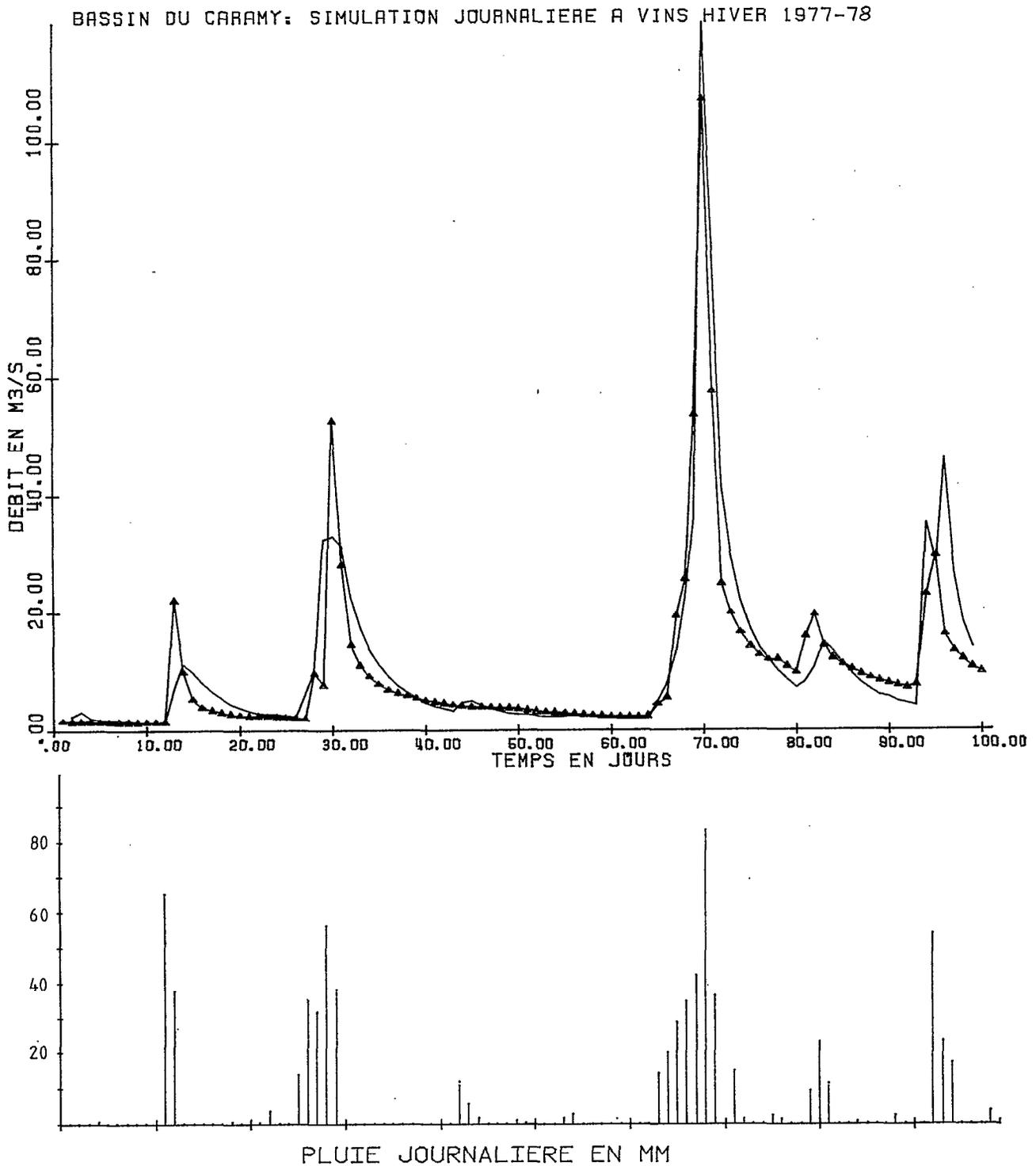


Fig. 44. — Reconstitution du débit journalier à Vins

#### 4. LA MISE EN OEUVRE DU MODÈLE COUPLÉ EST-ELLE UNE OPÉRATION LOURDE?

La première partie de cette publication avait pour ambition de rapprocher les études d'inventaire des études de modélisation en proposant l'intervention des modèles très tôt dans la connaissance du système hydrologique. Cette méthodologie était fondée sur le fait que les modèles, et en particulier le modèle couplé, considérant une part importante du cycle de l'eau, constituaient un bon outil de synthèse cohérente des informations concernant la ressource en eau d'un bassin versant.

En décrivant tout d'abord les principes d'élaboration du modèle couplé, puis en donnant deux exemples d'application sur des bassins hydrologiques de caractéristiques bien différentes, nous avons voulu apporter quelques arguments convaincants sur le bien fondé de cette proposition.

Les difficultés de détail rencontrées au cours des exemples décrits ayant pu faire croire au lecteur que l'application du modèle couplé relevait d'un niveau élevé de sophistication dans la description des systèmes hydrologiques, nous voudrions pour conclure convaincre que la finesse de modélisation n'est pas nécessairement accompagnée de lourdeur ni de la nécessité d'une grande quantité d'information.

Pour parvenir à ce but, nous prendrons un dernier exemple, celui de la modélisation schématisique des ressources en eau à l'échelle de la France, en priant le lecteur de bien vouloir pardonner le caractère peut-être un peu prétentieux d'une telle tentative, en ne considérant que la méthode et non pas le résultat.

##### 4.1. APPLICATION DU MODÈLE COUPLÉ A L'ÉCHELLE DE LA FRANCE — DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

Nous utiliserons essentiellement, pour établir cette schématisation, les cartes géologiques et hydrogéologiques au 1/1 500 000 récemment élaborées par le BRGM.

Le modèle de surface considèrera en priorité les quatre bassins versants principaux de la France, à savoir ceux de la Seine, de la Loire, de la Garonne et du Rhône, en y adjoignant en second lieu les bassins de la Vilaine, la Charente, l'Adour, la Meuse et la Moselle. Une discrétisation en 307 Mailles de 37,5 km de côté sera adoptée, et servira à définir le réseau de drainage de la Fig. 45.

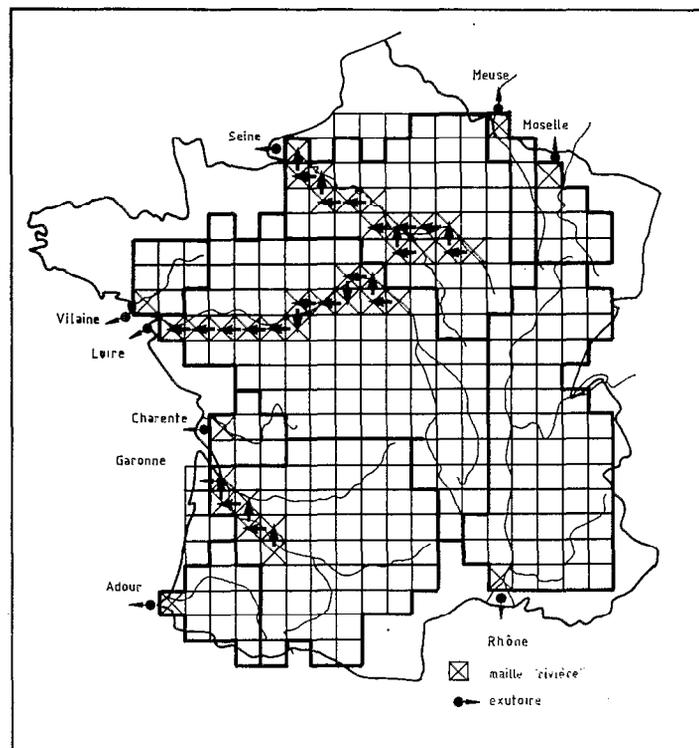


Fig. 45. — Modélisation des écoulements de surface

Par souci d'extrême simplification, nous ne considérerons que quatre aquifères essentiels des deux bassins sédimentaires majeurs de la France, à savoir :

- la nappe de la Craie dans le Bassin parisien,
- la nappe de l'Albien dans ce même bassin,
- la nappe du Plio-Quaternaire dans le Bassin aquitain,
- la nappe des Sables Eocènes dans ce même bassin.

La discrétisation de ces nappes en mailles carrées de 37,5 et 18,75 km de côté tiendra compte des nécessités de la modélisation de la relation nappe-rivière le long des cours d'eau principaux (Fig. 46 et 47).

Des valeurs régionales des transmissivités, coefficients de drainance, coefficients d'emménagement, établis d'après la littérature seront introduits en se servant de cette discrétisation.

Six catégories de fonctions production seront distinguées suivant les caractéristiques géologiques des formations affleurantes identifiées d'après la carte au 1/1 500 000 (Fig. 48) :

- ① formations tertiaires assez perméables (Eocène des Bassins parisien et aquitain),
- ② formations tertiaires peu perméables (Oligocène des Bassins parisien et aquitain),
- ③ formations crayeuses du Bassin parisien,
- ④ formations marno-calcaires de bordure des bassins,
- ⑤ formations peu perméables des massifs cristallins, métamorphiques et schisto-gréseux (Massif Central, Pyrénées, Alpes, Vosges et Massif armoricain).
- ⑥ formations perméables des bassins sédimentaires autres que les bassins aquitain et parisien.

#### 4.2. REMARQUES SUR LA SCHÉMATISATION ADOPTÉE

La structure qui vient d'être décrite est une conséquence d'hypothèses simplificatrices qui influenceront sur les résultats obtenus.

##### 4.2.1. *Domaine de surface*

La discrétisation en mailles carrées de 37,5 km de côté convient pour la description des quatre grands principaux bassins. Des erreurs importantes sur la superficie peuvent par contre être commises pour les petits bassins tels ceux de la Meuse ou de la Charente. Il aurait fallu utiliser dans ce cas la possibilité de découpage en mailles emboîtées offerte par le modèle.

##### 4.2.2. *Domaine souterrain*

Deux modes de représentation des transferts d'eau souterraine sont possibles par le modèle couplé, et correspondent à des situations hydrogéologiques distinctes :

- aquifères de grande extension devant la discrétisation de l'espace. Ce type d'aquifère autorise des transferts horizontaux de l'eau sur un grand nombre de mailles et devra ainsi être représenté au moyen d'une couche du domaine souterrain au sens où cela a été défini dans le second chapitre. C'est le cas de la nappe profonde de l'Albien dans le bassin Parisien ou de celle des Sables Eocènes dans le bassin Aquitain.
- aquifères de faible extension, c'est-à-dire d'un ordre de grandeur comparable à la taille des mailles de la surface. Dans ce cas, le transfert horizontal souterrain n'est plus à l'échelle du modèle et ne doit pas être simulé. Le rôle de l'aquifère se borne à un rôle de stockage temporaire sur place qui est assuré par le réservoir de transfert souterrain de la fonction production standard du modèle couplé. Cette schématisation a été choisie pour représenter les nappes de la vallée du Rhône et explique l'introduction de fonctions-production particulières (n° 4 et 6) dans cette zone.

Ces deux modes de représentation possibles permettent l'association d'une modélisation conceptuelle ou d'une modélisation globale du domaine souterrain rendant le modèle couplé apte à traiter des problèmes à différentes échelles.

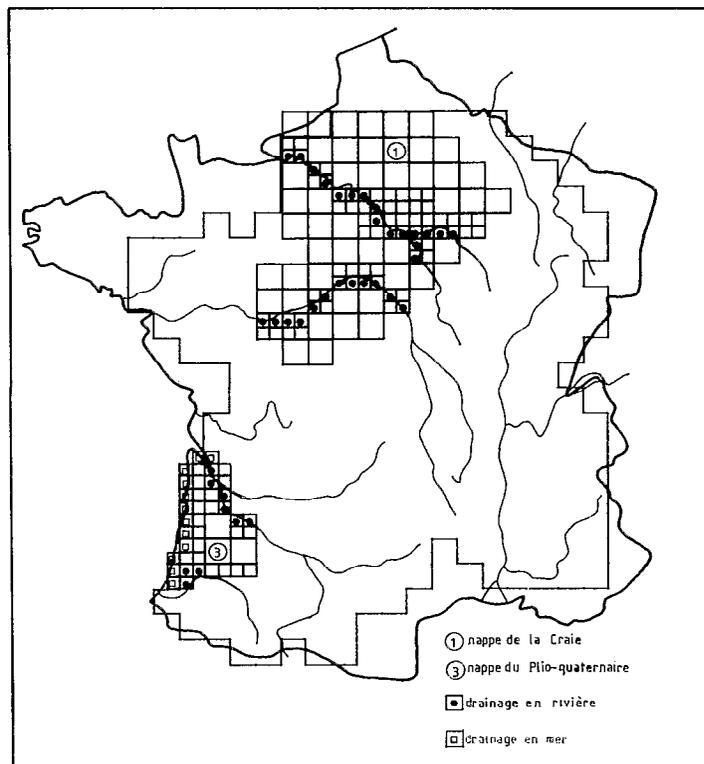


Fig. 46. — Modélisation des nappes superficielles

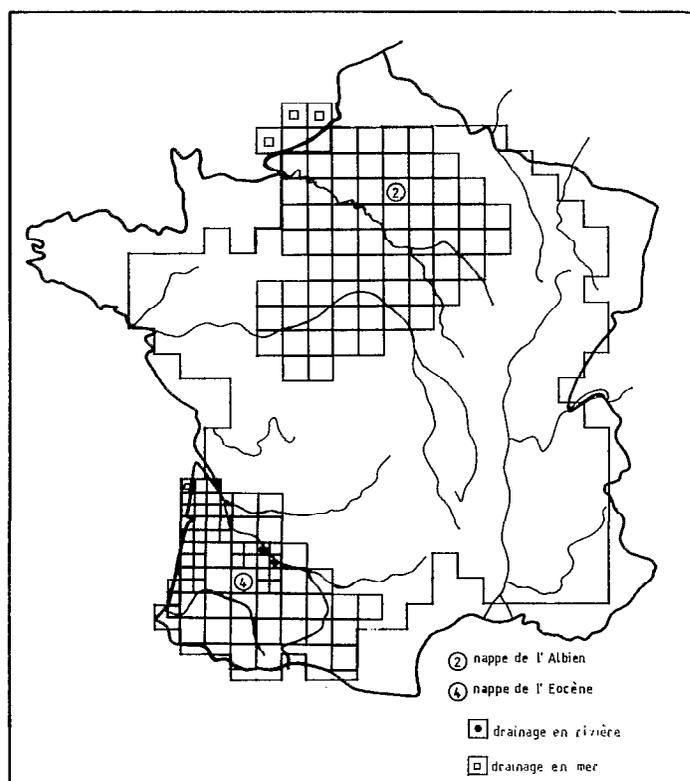


Fig. 47. — Modélisation des nappes profondes

#### 4.2.3. Cas particulier des nappes phréatiques

Dans un pays comme la France, les nappes superficielles sont en relation quasi permanente avec un réseau hydrographique pérenne. Compte tenu du chevelu existant dans le bassin Parisien et de la taille des mailles utilisées (37,5 km de côté), la piézométrie de la nappe phréatique se trouve imposée par le niveau des cours d'eau qui réalisent ainsi l'essentiel du transfert horizontal de l'eau.

Il aurait donc été possible de modéliser cette nappe au moyen de la seconde méthode décrite au paragraphe précédent. La représentation conceptuelle de la première méthode a cependant été retenue en raison de l'existence de l'aquifère profond de l'Albien. Il en est résulté la nécessité d'adopter une transmissivité régionale plus élevée pour tenir compte du transfert local par les cours d'eau non représentés du domaine de surface.

#### 4.3. LES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Quatre années de données pluviométriques décennales (1976 à 1979) ont été réunies sur 42 postes pluviométriques, conduisant au découpage en zones météorologiques de la Fig. 48.

Les données observées montrent une grande variabilité spatiale s'échelonnant de 620 mm à 2 300 mm par an, rendant délicate l'affectation d'une maille de la surface à un poste pluviométrique. A titre d'exemple, la station du Mont Aigoual intéresserait par la méthode des polygones de Thiessen 9 mailles, ce qui conduirait à une forte majoration des écoulements sur le bassin de la Garonne. Ce problème d'interpolation des données pluviométriques n'est pas particulier à l'application du modèle couplé, mais doit être résolu au préalable comme conditionnant l'entrée d'eau dans le système.

L'évapotranspiration potentielle décennale Penman possède une moins forte variabilité spatiale (600 à 900 mm par an) et a été recherchée en 14 stations.

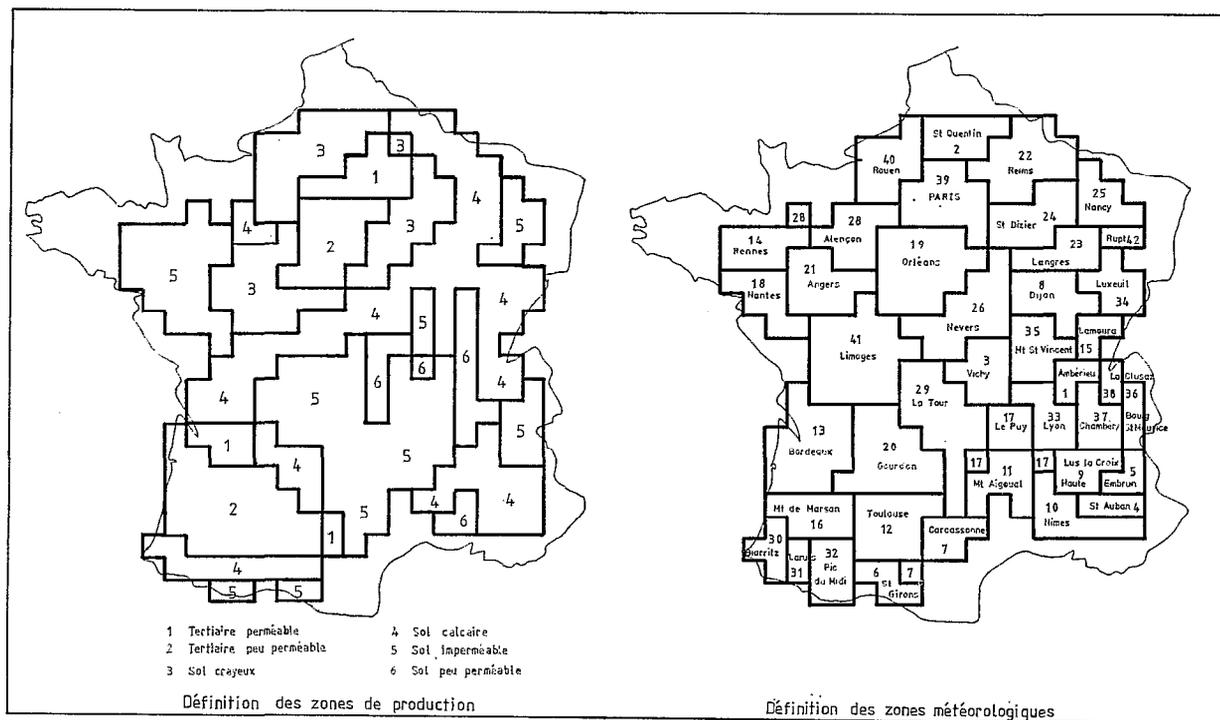


Fig. 48. — Discretisation des paramètres du domaine superficiel

#### 4.4. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

Deux simulations ont été effectuées. La première constitue une tentative de reconstitution des débits à l'exutoire des bassins de la Seine, de la Loire, de la Garonne et du Rhône pendant les années 1976 à 1979. La seconde vise à mettre en évidence l'influence présumée d'un couvert forestier sur le débit de la Seine.

##### 4.4.1. Reconstitution des débits aux exutoires

La Fig. 49 permet la comparaison, mois par mois, des débits calculés et des débits observés pour la Seine, la Loire, la Garonne et le Rhône (extension française du bassin). Ces valeurs ont été obtenues après quelques essais et un calage fin du modèle n'a pas été recherché. Notre but était de montrer la possibilité d'adaptation du modèle couplé à une très grande échelle et non pas de réaliser l'étude des bassins français. On note cependant une assez bonne restitution des crues et des étiages, surtout pour la Seine et la Loire, bien que des aspects influents tels que la présence de barrages-réservoirs ou de neige aient été totalement négligés.

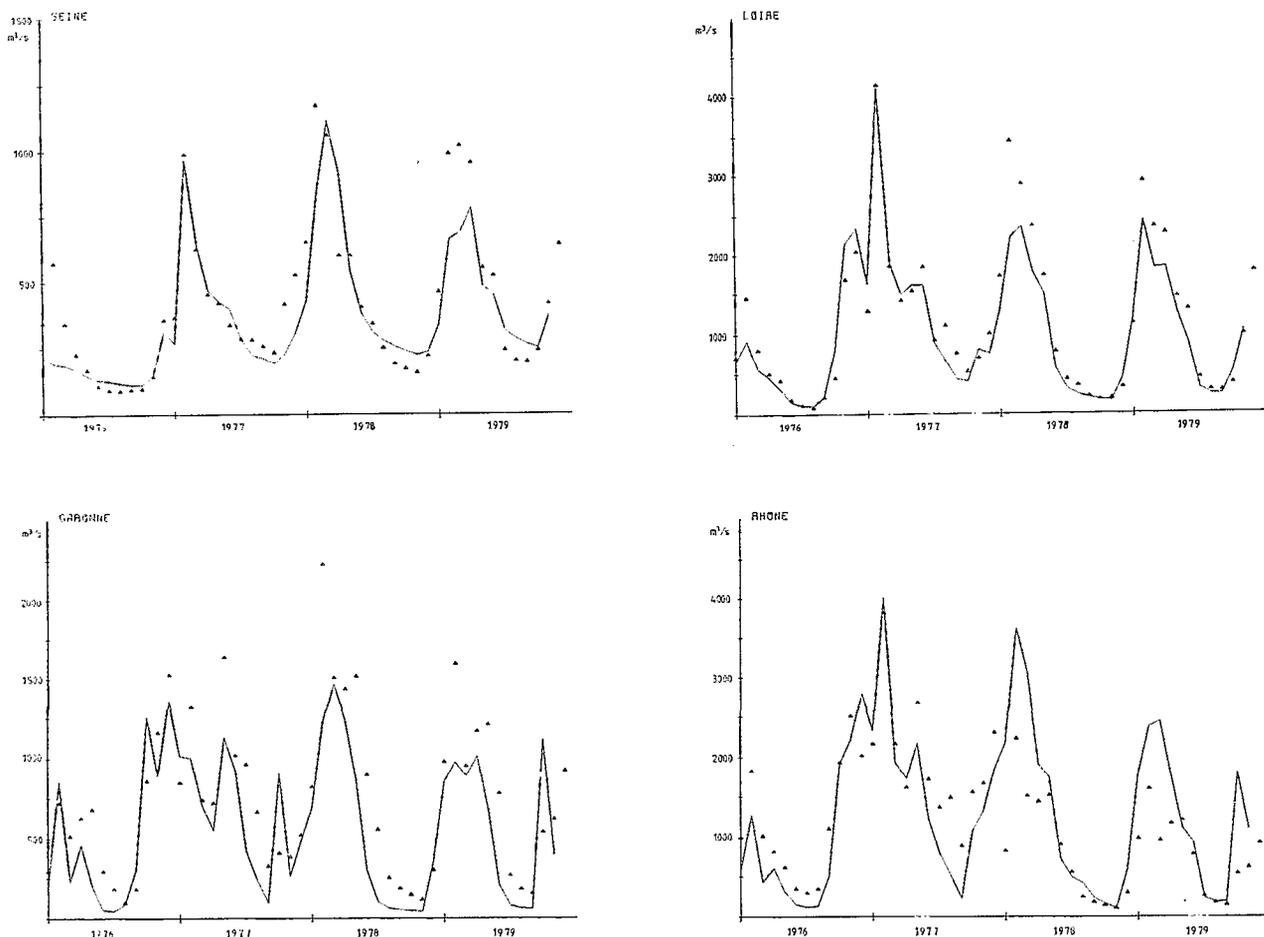


Fig. 49. — Comparaison des débits calculés et observés aux exutoires des bassins de la Seine, de la Loire, du Rhône et de la Garonne

## 4.4.2. Test de l'influence d'une couverture forestière

Pour illustrer l'emploi par le modèle des paramètres physiographiques, a été simulée, sur le bassin de la Seine, l'influence présumée d'un couvert forestier occupant la majeure partie de la superficie. Le résultat obtenu peut donner ainsi un aperçu de ce que pouvait être le débit de la Seine à une époque reculée avant défrichement.

Il a été admis, pour faire cette estimation, que la présence d'une forêt pouvait multiplier par 2 la variation du contenu en eau dans le sol (paramètre CRT des fonctions-production). Il en résulte un laminage important des crues et, dans une moindre mesure, une diminution des étiages, ce qui est illustré par la Fig. 50.

Cette application particulière du modèle ne doit être considérée que pour son caractère anecdotique. Pour la rendre plus crédible, il serait nécessaire tout d'abord d'affiner la connaissance pluviométrique pour améliorer le calage, ensuite de disposer d'informations concernant l'influence de la végétation sur la variation du stock en eau dans le sol. L'exemple précédent a cependant l'intérêt de montrer l'accessibilité du modèle à des modifications physiques des bassins, grâce à la représentation conceptuelle qui y est faite.

Dans le présent article il a été tenté de démontrer comment une représentation conceptuelle du cycle de l'eau sur un bassin versant pouvait être mise en œuvre à différentes échelles, c'est-à-dire incluant différents degrés de finesse dans la description des structures. Le modèle couplé a été conçu dans ce but et peut ainsi ouvrir la voie à une foule d'applications pratiques.

Dans une telle modélisation conceptuelle, les contraintes de mise en œuvre seront liées au rapport entre la question posée et la schématisation nécessaire pour y répondre. La complexité éventuelle d'utilisation du modèle couplé serait donc due à la complexité du problème, et non à celle de l'outil.

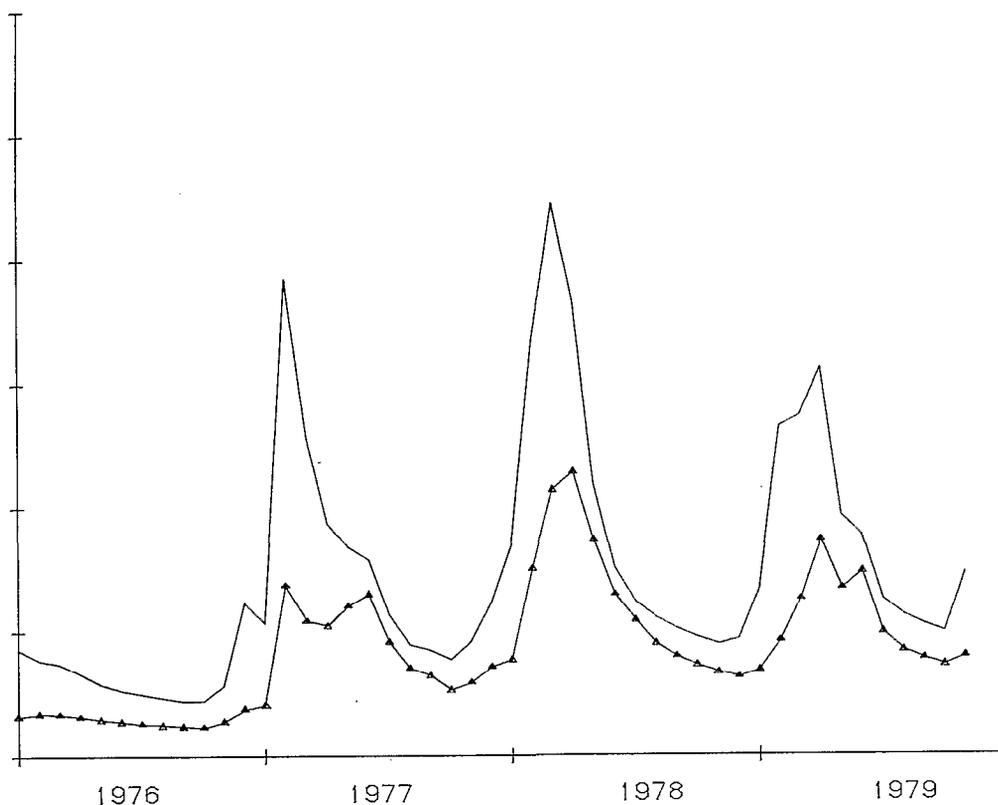


Fig. 50. — Bassin de la Seine, influence d'une couverture forestière sur le débit à l'exutoire

## 5. CONCLUSION

Les études d'inventaire des ressources en eau de surface et en eau souterraine menées par les organismes de gestion des réseaux de mesures fournissent, par des mesures de plus en plus précises et nombreuses aussi bien dans l'espace que dans le temps, les données indispensables à l'estimation des ressources potentielles en eau d'une région donnée et à la meilleure utilisation de celles-ci, compte tenu des aménagements existants (ou en projet), et en particulier des interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Le modèle couplé qui considère une part importante du cycle de l'eau constitue un bon outil de synthèse cohérente de toutes les informations concernant la ressource (pluviométrie, débitmétrie, piézométrie) et de ses différentes utilisations. Il peut intervenir très tôt dans la connaissance du système hydrologique et ce jusqu'à la phase ultime de l'exploitation contrôlée de cette ressource.

S'il est bien évident que la description des systèmes hydrologiques complexes demande des connaissances spécifiques, il est tout à fait justifié de procéder, à l'aide de ce modèle couplé, par étapes de plus en plus précises dans cette description grâce à l'exploitation de toutes les données de mesures et au fur et à mesure de l'accroissement des connaissances.

La mise en œuvre de cet outil dans un but défini fait appel à un ensemble de connaissances descriptives du milieu étudié, fonction du but poursuivi, qu'il est indispensable de posséder. Il s'agit donc de mettre en œuvre le potentiel des connaissances sur le fonctionnement du système hydrologique (caractéristiques du système, dimension et structure hydrogéologique, paramètres hydrodynamiques, conditions aux limites, conditions initiales, etc.), c'est-à-dire de définir le système dans sa représentation schématique, puis de rassembler toutes les informations quantitatives variables dans le temps et dans l'espace (précipitation, pompages et rejets) nécessaires à la simulation sans oublier toutes celles permettant une comparaison avec les produits obtenus lors de la simulation (débits des cours d'eau et sources, niveaux piézométriques dans l'espace et le temps).

Le modèle couplé, par son caractère conceptuel, a la propriété d'être transposable régionalement. Cela nécessite toutefois pour les utilisateurs de bien connaître les structures du système hydrologique à étudier.

Avec l'adjonction de la simulation des variations du stockage des eaux dans les réservoirs naturels ou artificiels, ce modèle, dans un très proche avenir, permettra de prendre en compte la majeure partie des influences réciproques des stockages superficiels et souterrains.

## 6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### 6.1. INTRODUCTION ET PREMIÈRE PARTIE

- [1] ARMISEN (P.), BESBES (M.), LEDOUX (E.), LEVASSOR (A.), MARSILY (G. de), POITRINAL (D.) — Sammir : un programme mathématique de simulation des aquifères multicouches en mailles irrégulières. Congrès de Porto-Alegre (Brésil) réf. LHM/RD/75/23, 1975.
- [2] GIRARD (G.), MORIN (G.), CHARBONNEAU (R.) — Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, vol. IX, n° 4, 1972.
- [3] LEDOUX (E.), LEVASSOR (A.), CHARBONNEAU (R.), MORIN (G.), VILLENEUVE (J.-P.) — Simulation des débits de l'Orne, la Dives et la Seulles — Coopération franco-québécoise, 1976.
- [3 bis] 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.
- [4] MANLEY (R. E.) — The use of hydrological model in water resources planning. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Part 2, 65, 1978.
- [5] 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.
- [6] 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.

## 6.2. DEUXIÈME PARTIE

- [1] BERNIER (J.) — Ajustement des modèles probabilistes en hydrologie de surface. *La Houille Blanche*, n° 2, 1971.
- [2] BESBES (M.) — L'estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle régional d'infiltration efficace. Thèse d'Etat, Université P. & M. Curie, 1978.
- [3] CAZAILLET (O.) — Ecoulement des fluides incompressibles à travers les semi-perméables. Applications aux modèles hydrogéologiques. Rapport Ecole des Mines, rapport LHM/R74/25, 1974.
- [4] CORMARY (Y.) et GUILBOT (A.) — Ajustement et réglage des modèles déterministes, méthode de calage des paramètres. *La Houille Blanche*, n° 2, 1971.
- [5] DEGALLIER (R.) — Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO. *Bulletin du BRGM*, section III, n° 3, 1972.
- [6] DELHOMME (J.-P.) — Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université P. & M. Curie, 1976.
- [7] GAUDU (R.) — Structures arborescentes et maillées en hydraulique et hydrologie. Thèse d'Etat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1978.
- [8] GIRARD (G.), LEDOUX (E.), VILLENEUVE (J.-P.) — Modèle intégré pluie-eau de surface-eau souterraine. Société Hydrotechnique de France, session 114, novembre 1979.
- [9] GIRARD (G.) — Essai pour un modèle hydropluviométrique conceptuel et son utilisation au Québec. *Cahiers de l'ORSTOM, service Hydrologie*, vol. IV, n° 1, 1970.
- [9 bis] GIRARD (G.) — Modèle global ORSTOM 1974. Première application du modèle journalier à discrétisation spatiale sur le bassin versant de la crique Grégoire, en Guyane. Atelier Hydrologique sur les Modèles Mathématiques, ORSTOM, 1975.
- [9 ter] GIRARD (G.), MORIN (G.), CHARBONNEAU (R.) — Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, vol. IX, n° 4, 1972.
- [10] GIRARD (G.), MORIN (G.), CHARBONNEAU (R.) — Utilisation d'un modèle de fonte de neige à mailles physiographiques. *Hydrological Sciences Bull.*, tome 18, n° 1, 3/73, 1973.
- [11] JACQUET (J.) — Aspects généraux de la représentation mathématique des phénomènes en hydrologie de surface. *La Houille Blanche*, n° 2, 1971.
- [12] KNAPP (R. M.) — Development and field testing of a basin hydrology simulator. *WRR*, vol. II, n° 6, 1975.
- [13] L'AOUR (A. M.) — Etude bibliographique sur les modèles mathématiques représentant les écoulements superficiels et souterrains sur un bassin hydrologique. Mémoire de DEA Sciences de l'Eau, Université P. & M. Curie, Ecole des Mines de Paris, 1979.
- [14] LEDOUX (E.) — Programme NEWSAM — Principe et notice d'emploi. Rapport Ecole des Mines LHM/R75/11, 1975.
- [15] LEDOUX (E.) — Note de réflexion sur la construction du modèle couplé. Rapport Ecole des Mines de Paris LHM/R77/18, 1977.
- [16] LEVASSOR (A.) — Simulation et gestion des systèmes aquifères. Application aux nappes du Complexe Terminal du Bas-Sahara algérien. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Université P. & M. Curie, Ecole des Mines de Paris, 1978.
- [17] MANLEY (R. E.) — Simulation of flows in ungauged basins. *Hydrological Sciences Bulletin*, tome 23, n° 1, 3/78, 1978.
- [18] MANLEY (R. E.) — The soil moisture component of mathematical catchment simulation models. *Journal of Hydrology*, 35, 1977.
- [19] MOUGIN ET DUJARDIN — Les modèles déterministes de transformation pluie-débit. *La Houille Blanche*, n° 4, 1972.
- [20] NASH (J. E.) — Systematic determination of unit hydrograph parameters. *Journ. of Geophys. Res.*, vol. 64, n° 1, 1959.
- [21] NIELSEN (D. R.), BIGGAR (J. W.) — Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. *WWR*, vol. 12, n° 1, 1976.
- [22] NIELSEN (D. R.), BIGGAR (J. W.), ERH (K. T.) — Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia*, 42 (7), pp. 215-259, 1973.
- [23] OBERLIN (J.) — Relations pluie-débit. *CTGREF*, 1969.
- [24] ROCHE (M.) — Les divers types de modèles déterministes. *La Houille Blanche*, n° 2, 1971.

6.3. TROISIÈME PARTIE

- [1] BESBES (M.), DUERMAEL (G.), LEDOUX (E.), MARSILY (G. de), TALBOT (A.) — Soutien des étiages d'une rivière par pompage dans la nappe qu'elle draine. Mythe ou réalité? *Bulletin du BRGM*, 2<sup>e</sup> série, 1980.
- [2] BESBES (M.) — L'estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle régional d'infiltration efficace. Thèse de Doctorat d'État, Université P. & M. Curie, 1978.
- [3] CAULIER (P.) — Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Université des Sciences et Techniques de Lille, 1974.
- [4] 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 P. & M. Curie, 1980.